

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN INGÉNIERIE, CONCENTRATION GÉNIE INDUSTRIEL

PAR
SÉBASTIEN GAMACHE

EFFET DES CELLULES DYNAMIQUES SUR LA PERFORMANCE DES
ENTREPRISES RÉSEAUX

AVRIL 2016

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS-RIVIÈRES

Ce mémoire intitulé:

EFFET DES CELLULES DYNAMIQUES SUR LA PERFORMANCE DES
ENTREPRISES RÉSEAUX

Présenté par: GAMACHE Sébastien

En vue de l'obtention du diplôme de: Maître ès sciences appliquées

A été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

ABDULNOUR Georges, professeur, directeur de recherche

NOM Prénom, grade, membre

NOM Prénom, grade, membre

REMERCIEMENTS

Avant de débiter la lecture de ce mémoire, je tiens à remercier sincèrement M. Georges Abdounour sans qui ce travail n'aurait jamais pu être ce qu'il est aujourd'hui. Je ne pourrai jamais le remercier suffisamment pour tous ses conseils, son assistance, sa confiance et tout le temps qu'il a pris pour m'éclairer et me guider dans l'avancement de ce travail, mais également dans mon développement professionnel. Il est un modèle à suivre. Il est l'une de ces personnes qui nous poussent à aller toujours plus loin. Pour ce travail, mais aussi pour tout ce qu'il est et a été pour moi, je tiens à le remercier sincèrement.

Ma reconnaissance s'adresse également à l'entreprise québécoise qui a servi de modèle dans ce travail ainsi qu'à la bourse Mitacs Accélération sans qui un tel projet n'aurait pu avoir cette consistance. L'ensemble des connaissances qui m'ont été acquises grâce à cette fabuleuse expérience méritent d'être mentionné et de leur être attribué. Le soutien et la confiance qui m'ont été donnés dans l'ensemble de l'entreprise m'ont permis de m'épanouir dans ce projet et faire valoir mes compétences professionnelles sur le terrain. Pour toutes ces raisons, je désire les remercier chaleureusement.

SOMMAIRE

À l'ère de la mondialisation, les entreprises manufacturières font face à de nombreux défis. La concurrence mondiale, la personnalisation des produits, l'imprévisibilité de la demande et la diminution du cycle de vie des produits amènent à un besoin d'efficacité et de flexibilité. Le développement des réseaux devient essentiel si les entreprises désirent se tailler une place de choix sur le marché. Dans un tel contexte, il convient de se demander quels éléments peuvent venir favoriser la performance des réseaux. La littérature aborde plusieurs éléments autour de cette question. La standardisation des produits par la conception modulaire et l'utilisation des cellules dynamiques qui alimentent une ligne mixte deviennent de plus en plus répandus dans les industries. La recherche actuelle a pour objectif de déterminer si l'utilisation des cellules de travail dynamiques dans les réseaux pourra affecter positivement la performance globale des réseaux d'entreprises.

Une revue de littérature a permis de déterminer les facteurs communs entre les cellules dynamiques et les réseaux. Ces facteurs ont amené à l'élaboration de deux designs expérimentaux : un plan Taguchi L18 afin de déterminer les facteurs les plus significatifs ainsi qu'un plan complet afin de permettre l'étude des interactions. Un modèle de simulation Monte-Carlo a également pu être monté grâce à la participation d'une entreprise québécoise spécialisée dans la conception et l'assemblage d'appareils électromécaniques. Les expériences ont été menées par simulation à l'aide du logiciel Rockwell Arena. L'implantation réelle des cellules dynamiques a également été faite en parallèle dans cette même entreprise. Celle-ci a permis de soulever, dans un premier temps, l'effet réel des cellules dynamiques dans un contexte réel, et également les facteurs de succès d'implantation des cellules dynamiques.

La simulation démontre que l'interdisciplinarité, la présence d'une structure modulaire, une production en cellules dynamiques, un nombre d'employés suffisant, un système d'alimentation en kanban et une fiabilité des fournisseurs élevée permettent d'optimiser

le temps de réaction, le nombre d'encours, le temps de passage et les ventes totales. La comparaison de la situation proposée à la situation initiale démontre des gains de 25,6% au niveau de la quantité de commandes sortantes ainsi qu'une réduction de 20,6% du nombre d'encours, 57,7% du temps de passage et 57,6% du délai de réaction. Au terme de cette recherche, il est donc possible de conclure que l'efficacité et la flexibilité globale des réseaux d'entreprises pourra être améliorée par la standardisation des composantes, la conception modulaire et les cellules dynamiques dans un système de ligne d'assemblage mixte et où l'environnement est en continuel changement.

Mots-clés : DCMS, cellules dynamiques, entreprises réseaux, structure modulaire, DOE, simulation, facteurs de succès, étude de cas

TABLE DES MATIÈRES

Sommaire	v
Introduction	1
Chapitre 1 : Mise en contexte	3
1.1 Problématique.....	3
1.2 Question de recherche	4
1.3 Objectif principal.....	4
1.4 Objectifs secondaires.....	5
1.5 Concepts importants	5
1.5.1 Cellules de travail :.....	5
1.5.2 Cellules dynamiques :	5
1.5.3 Entreprises réseaux :	6
1.5.4 Productivité :	6
1.5.5 Flexibilité :	6
1.5.6 PME :	6
1.5.7 Mondialisation :	7
1.6 Conclusion.....	7
Chapitre 2 : Revue de littérature	8
2.1 Cellules dynamiques.....	8
2.1.1 Les modèles mathématiques	9
2.1.2 Comparaison des systèmes de production.....	12
2.1.3 Facteurs de succès d'implantation	13
2.2 Les entreprises réseaux.....	14
2.3 Conclusion.....	18
2.4 Matrice de la revue de littérature.....	19
2.5 Modèle de recherche – Cadre conceptuel.....	28
2.6 Expérience terrain.....	30
Chapitre 3 : Méthodologie de la recherche	32
3.1 Choix des variables et des niveaux.....	36
3.2 Hypothèses statistiques.....	38
3.3 Hypothèses limitatives	40

3.4	Modèle mathématique	41
3.5	Plan d'expérience L18	42
3.6	Plan d'expérience L18 considérant les facteurs et niveaux à l'étude.	44
3.7	Modèle de simulation	45
3.8	Données de simulation	48
3.9	Calculer le régime permanent.....	49
3.10	Expérimentation Plan L18.....	50
3.11	Plan d'expérience complet	53
3.12	Plan d'expérience du plan complet	55
3.13	Expérimentation Plan complet	55
3.14	Étapes de validation.....	55
Chapitre 4 : Résultats et discussions		57
4.1	Résultats et analyse du plan L18	57
4.2	Résultats et analyse du plan complet.....	61
4.3	Validation	68
4.4	Atteinte du régime permanent	69
4.5	Discussion	71
Chapitre 5 : Projet Mitacs		73
5.1	Méthodologie sur le terrain	74
5.1.1	Objectifs	74
5.2	Projets d'amélioration apportés.....	82
5.2.1	Projets plancher 2015	82
5.2.2	Projets plancher 2016.....	85
5.3	Facteurs de succès d'implantation.....	88
5.4	Conclusion du projet Mitacs.....	89
Conclusion		91
Liste des références		93
7.1	Articles scientifiques	93
7.2	Ouvrages.....	97
7.3	Sites web.....	98
ANNEXE I : Plan L18		99
ANNEXE II : Résultats Plan L18		102

ANNEXE III : ANOVA et Test de Tukey Plan L18	105
ANNEXE IV : Plan complet.....	113
ANNEXE V : Résultats du Plan complet.....	118
ANNEXE VI : Résultats ANOVA Plan complet.....	123
ANNEXE VII : Résultats des tests de validation.....	136
ANNEXE VIII : Analyse et test de Tukey des tests de validation.....	138
ANNEXE IX : Résultats des tests en régime permanent	142
ANNEXE X : Analyse et test de Tukey des tests en régime permanent.....	143

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Matrice synthèse des DCMS.....	20
Tableau 2-2 : Matrice synthèse des DCMS (suite)	21
Tableau 2-3 : Matrice synthèse des DCMS (suite)	22
Tableau 2-4 : Matrice synthèse des DCMS (suite)	23
Tableau 2-5 : Matrice synthèse des entreprises réseaux	24
Tableau 2-6 : Matrice synthèse des entreprises réseaux (suite)	25
Tableau 2-7 : Matrice synthèse des entreprises réseaux (suite)	26
Tableau 2-8 : Matrice synthèse des entreprises réseaux (suite)	27
Tableau 3-1 : Variables dépendantes en fonction des auteurs	33
Tableau 3-2 : Variables indépendantes en fonction des auteurs	34
Tableau 3-3 : Variables et leurs niveaux respectifs	42
Tableau 3-4 : Plan Taguchi L18.....	43
Tableau 3-5 : Plan d'expérience L18.....	44
Tableau 3-6 : Fréquence des options pour chaque commande	45
Tableau 3-7 : Temps d'opérations utilisés pour la simulation.....	48
Tableau 3-8 : Paramètres modifiés par changement de niveau.....	51
Tableau 3-9 : Plan d'expérience L18.....	52
Tableau 3-10 : Facteurs et niveaux pour le plan complet	55
Tableau 4-1 : ANOVA pour le plan L18 (Quantité sortante)	58
Tableau 4-2 : ANOVA pour le plan L18 (Nombre d'encours).....	58
Tableau 4-3 : ANOVA pour le plan L18 (Délai de réaction)	58
Tableau 4-4 : ANOVA pour le plan L18 (Temps de passage).....	59
Tableau 4-5 : Niveaux optimaux pour les différentes réponses	61
Tableau 4-6 : ANOVA pour le plan complet (Quantité sortante).....	62
Tableau 4-7 : ANOVA pour le plan complet (Nombre d'encours)	63
Tableau 4-8 : ANOVA pour le plan complet (Temps de réaction).....	64
Tableau 4-9 : ANOVA pour le plan complet (Temps de passage)	65
Tableau 4-10 : Combinaisons optimales pour les différentes réponses plan complet	67

Tableau 4-11 : Facteurs et niveaux pour expériences de validation	68
Tableau 4-12 : ANOVA de validation pour la quantité sortante	68
Tableau 4-13 : ANOVA de validation pour le nombre d'encours	69
Tableau 4-14 : ANOVA de validation pour le temps de passage	69
Tableau 4-15 : ANOVA de validation pour le temps de réaction.....	69
Tableau 4-16 : ANOVA de la comparaison en régime permanent pour la quantité sortante	70
Tableau 4-17 : ANOVA de la comparaison en régime permanent pour le nombre d'encours	70
Tableau 4-18 : ANOVA de la comparaison en régime permanent pour le temps de passage	70
Tableau 4-19 : ANOVA de la comparaison en régime permanent pour le temps de réaction	71
Tableau 5-1 : Objectifs et plan d'actions pour la production pour l'année 2016.....	87
Tableau ANNEXE I-1 : Plan L18	99
Tableau ANNEXE I-2 : Plan L18 (suite).....	100
Tableau ANNEXE I-3 : Plan L18 (suite).....	101
Tableau ANNEXE II-1 : Résultats Plan L18	102
Tableau ANNEXE II-2 : Résultats Plan L18 (suite).....	103
Tableau ANNEXE II-3 : Résultats Plan L18 (suite).....	104
Tableau ANNEXE IV-1 : Plan complet.....	113
Tableau ANNEXE IV-2 : Plan complet (suite).....	114
Tableau ANNEXE IV-3 : Plan complet (suite).....	115
Tableau ANNEXE IV-4 : Plan complet (suite).....	116
Tableau ANNEXE IV-5 : Plan complet (suite).....	117
Tableau ANNEXE V-1 : Résultats du plan complet.....	118
Tableau ANNEXE V-2 : Résultats du plan complet (suite)	119
Tableau ANNEXE V-3 : Résultats du plan complet (suite)	120
Tableau ANNEXE V-4 : Résultats du plan complet (suite)	121

Tableau ANNEXE V-5 : Résultats du plan complet (suite)	122
Tableau ANNEXE VII-1 : Résultats du plan de validation pour la situation initiale	136
Tableau ANNEXE VII-2 : Résultats du plan de validation pour la situation proposée.	136
Tableau ANNEXE VII-3 : Résultats du plan de validation pour la situation post-Mitacs	137
Tableau ANNEXE IX-1 : Résultats du plan en régime permanent	142

Liste des figures

Figure 2-1 : Adapté de la représentation de la gestion de chaîne d'approvisionnement selon Mentzer et al. (2001)	28
Figure 2-2 : Cadre conceptuel de l'étude	30
Figure 3-1 : Diagramme d'Ishikawa	35
Figure 3-2 : Réponse, facteurs et niveaux	37
Figure 3-3 : Modèle de simulation	47
Figure 3-4 : Temps d'instauration du régime permanent dans le modèle de simulation	49
Figure 5-1 : Exemples de mesures de performance	75
Figure 5-2 : Relations entre les projets et les facteurs de succès	89

Liste des équations

Équation 3-1 : Modèle mathématique de l'expérience	41
Équation 3-2 : Modèle mathématique de l'expérience du plan complet	53

INTRODUCTION

Pour certaines organisations, la mondialisation semble être synonyme d'un bénéfice majeur alors que pour d'autres, elle constitue un défi considérable. La chute des barrières internationales tant au niveau commercial que manufacturier crée une structure mondiale où la compétitivité et la productivité sont la clé pour la survie des entreprises locales (De Loecker et Goldberg, 2014). Au Québec, on remarque que la productivité est nettement plus faible que chez ses confrères ontariens et américains (Radio-Canada, 2006).

Le transfert des ressources en Chine et l'importation de masse de nombreux produits à moindre coût affectent les entreprises québécoises. L'augmentation de la productivité est la solution pour regagner le marché.

Toutefois, la hausse des produits sur mesure, les changements rapides et imprévisibles des consommateurs, la requête du prix le plus bas, la durée du cycle de vie des marchandises qui diminue continuellement et le développement incessant de la technologie obligent à concilier productivité et flexibilité.

Les PME (Petites et moyennes entreprises) au Québec ont cet avantage. Leur petite taille donne souvent lieu à une agilité que l'on ne retrouve pas dans les grandes entreprises (TheOpenGroup, 2014). Il faut alors trouver un moyen d'intégrer cet avantage et d'en faire sa prérogative majeure.

D'un autre côté, une entreprise ne travaille pas seule. Elle fait partie intégrante d'un réseau de fournisseurs et clients (appelé chaîne d'approvisionnement) qui doit, tout comme elle, se démarquer tant au niveau de l'efficacité que de la flexibilité. Il est dans l'avantage de tout le réseau de se développer mutuellement afin de mettre la main sur le marché mondial (Poulin et al., 1994).

De nombreux auteurs ont étudié l'effet des différents systèmes de production sur l'efficacité interne d'une entreprise. Entre autres, les cellules de production dynamiques

représentent une méthode d'amélioration de l'efficacité et la flexibilité dans un environnement turbulent. D'autres chercheurs ont évalué l'impact de nombreux facteurs sur la performance des réseaux. Toutefois, aucun pont n'a été fait entre l'utilisation des cellules dynamiques et la performance des entreprises réseaux.

L'efficacité interne des entreprises a un impact majeur sur l'ensemble des activités d'un réseau. La revue de littérature permettra de déterminer où la communauté scientifique se situe au niveau des connaissances dans ce domaine. Une méthodologie alliant le design expérimental et la simulation par événements discrets permettra d'étudier un cas réel dans des nouvelles conditions expérimentales.

Dans les pages suivantes, il sera possible de comprendre plus clairement le comportement des entreprises réseaux dans des situations où les conditions de production et environnementales sont perpétuellement perturbées. Le chapitre 1 couvrira la problématique, les questions de recherche ainsi que le but de l'étude. Une ressensions des écrits sera abordée et analysée au chapitre 2. Le chapitre 3 présentera la méthodologie utilisée pour la poursuite de la recherche. Le chapitre 4 sera dédié à l'analyse des données et à la discussion. Un projet en milieu réel sera présenté au chapitre 5. Enfin, une conclusion permettra de synthétiser les informations les plus marquantes du travail exécuté.

CHAPITRE 1

MISE EN CONTEXTE

Dans ce chapitre, il sera possible de prendre connaissance de la problématique constatée. Cette dernière a soulevé des questions de recherche qui orienteront la suite de l'étude. De par la sélection d'une ou plusieurs questions, un objectif primaire est déterminé et des objectifs secondaires choisis.

1.1 PROBLÉMATIQUE

Dans le contexte de mondialisation actuel, l'efficacité des entreprises est incontournable. De nombreuses entreprises travaillent individuellement pour des objectifs personnels singuliers sans tenir compte des activités se déroulant en amont et en aval. Les entreprises doivent être conscientes des conséquences que peuvent engendrer leurs propres pratiques au sein du bien-être de leur réseau. Dans un monde aussi concurrentiel, il est important de prendre en compte les effets de sa participation dans un réseau et les impacts de ses actions individuelles. L'entreprise doit être consciente qu'il est nécessaire d'avoir une intégration horizontale et verticale dans le réseau. La cohérence et les objectifs communs avec l'ensemble du réseau est nécessaire.

Chaque PME recherche l'efficacité et la flexibilité. Le réseau peut aider à bonifier ces deux exigences. L'idée est de voir comment il sera possible d'améliorer cette productivité tout en demeurant flexible.

Le système des cellules de production dynamiques, élaboré en 1995 par Rheault et al., s'intéresse à améliorer la productivité et la flexibilité des entreprises manufacturières dans un contexte de turbulence. Bien que certains auteurs ne soient pas tout à fait convaincus de leur nécessité (Darkov et Naydenov, 2011), d'autres affirment que ce système a réellement su faire ses preuves dans de nombreux contextes (Drolet et al., 2008).

1.2 QUESTION DE RECHERCHE

Face à cette réalité où efficacité et flexibilité doivent être maximisées simultanément, il est naturel de se demander comment il sera possible de le faire. La première question que l'on se pose est donc la suivante :

Comment est-il possible de régler les problèmes d'efficacité dans les réseaux tout en conservant une flexibilité concurrentielle?

En considérant une situation où les cellules dynamiques sont effectivement efficaces comparativement aux autres modes de production tels les *Job shop* et les cellules classiques, il convient de se demander si l'utilisation des cellules de travail dynamiques pourraient permettre d'améliorer cette efficacité.

Évidemment, il faut comprendre que ce n'est pas tous les profils d'entreprise qui demandent l'utilisation des cellules dynamiques. Certains auteurs ont d'ailleurs abordé ce sujet (Drolet et al. 2008). Dépendamment de nombreux facteurs, il peut devenir plus intéressant d'opter pour une production par produit (très efficace, mais peu flexible) ou à l'inverse, pour une production en ateliers (très flexible, mais peu efficace).

1.3 OBJECTIF PRINCIPAL

L'objectif principal de cette recherche sera de déterminer l'effet de l'utilisation des cellules dynamiques sur l'efficacité et la flexibilité des entreprises réseaux. L'efficacité sera déterminée par le nombre d'encours et la quantité de commandes sortantes. La flexibilité sera mesurée par le temps de passage et le temps réaction de l'entreprise pour répondre à la demande. Un réseau où la demande est variable tant en termes de quantité que du mix-produit sera considéré.

1.4 OBJECTIFS SECONDAIRES

Quelques objectifs secondaires ont été déterminés à la suite de l'élaboration des questions de recherche. Le premier objectif secondaire sera de déterminer les conditions de réussite pour l'utilisation des cellules dynamiques dans le contexte réseau. Les structures modulaires sont un exemple de facteur qu'il sera intéressant de vérifier. Il sera également intéressant de vérifier s'il est possible de déterminer un indicateur de performance des réseaux qui sera représentatif de la réalité. Aussi, l'étude permettra de vérifier s'il existe la possibilité d'établir un pont entre le profil des entreprises et l'utilisation des cellules dynamiques dans les réseaux. Enfin, l'étude des interactions entre les différents facteurs étudiés sur la performance des réseaux ajoutera un intérêt à la recherche actuelle.

1.5 CONCEPTS IMPORTANTS

Afin de bien saisir l'étendue de la recherche, il convient de définir la signification de quelques concepts.

1.5.1 Cellules de travail :

Concept provenant de la théorie de la technologie de groupe qui consiste en le regroupement physique de machines (ou postes de travail) pour la fabrication d'une gamme de produits (nommée « famille de produits ») comportant un fort pourcentage de similarité (Tompkins et al., 2010). Au sein des cellules, il est possible de concilier productivité et flexibilité et on y retrouve généralement un flux pièce à pièce au sein des cellules et une élimination continue des gaspillages inter et intracellulaires.

1.5.2 Cellules dynamiques :

Contrairement aux cellules de travail classiques, les cellules dynamiques ne sont pas fixes. Les cellules dynamiques reposent sur le même principe de base que les cellules de travail, sauf qu'elles peuvent changées physiquement selon la production actuelle. Les cellules dynamiques sont alors formées et déformées dans le temps dépendamment de la demande et si et seulement si le déplacement des machines est économiquement justifiable (Rheault et al., 1996). Il sera possible de considérer l'utilisation des cellules dynamiques si

l'aménagement supporte une production cellulaire (production pièce à pièce selon des familles de produits) et sera mesurée à partir de la présence ou l'absence de la cellule.

1.5.3 Entreprises réseaux :

Une entreprise est nécessairement intégrée au sein d'un réseau, mais pour parler « d'entreprise réseau », il faut qu'il y ait une communication directe et active entre les différents partis (Poulin et al., 1994). C'est la répartition des tâches, la collaboration étroite et la confiance qui règnent entre les entreprises qui définissent le réseau. Le réseau doit avoir un court délai de réaction, un pourcentage d'intégration des partenaires à la conception, une intégration rapide des partenaires dans le processus, une modularisation des pièces fournies, un degré de spécialisation relativement élevé chez chaque fournisseur. Le réseau sera évalué en fonction de la présence d'interactions entre les entreprises du réseau.

1.5.4 Productivité :

Concept répandu qui consiste en un mélange de rendement et d'efficacité (Hulten, 2000). Il s'agit de l'atout majeur que recherchent les entreprises pour se démarquer et offrir un produit ou un service à un coût moindre tout en assurant un bon revenu. La productivité se définira dans cette recherche à partir de la capacité du réseau, le nombre d'encours présents sur le plancher.

1.5.5 Flexibilité :

Capacité d'une entreprise à répondre rapidement aux changements du marché sans affecter l'efficacité globale (Sushil et Stohr, 2013). Une entreprise flexible est généralement agile et donc, en mesure de changer sa production rapidement à moindre coûts. Le temps de passage des produits sur le plancher et le temps de réaction de la ligne entre deux produits seront les indicateurs pour ce concept.

1.5.6 PME :

Acronyme signifiant "Petites et Moyennes Entreprises". La PME sera définie comme étant une entreprise embauchant moins de 500 employés (Industrie Canada, 2012).

1.5.7 Mondialisation :

Ensemble des effets ressentis par la libéralisation des échanges tant au niveau des marchandises que sur le plan monétaire et humain (Houtart, 2007). C'est l'augmentation de la compétitivité sur le plan mondial et le transfert des ressources dans les entreprises à plus faibles revenus. Il est possible de la remarquer par l'expatriation des entreprises manufacturières et des sièges sociaux dans d'autres pays. Il s'agit d'un amalgame de stratagèmes pour maximiser les revenus et minimiser les dépenses en dépit des barrières internationales.

1.6 CONCLUSION

Essentiellement, cette recherche tentera de résoudre les problèmes d'efficacité dans les réseaux des PME québécoises. Les résultats obtenus lors de cette étude auront des conséquences significatives dans la réalité des entreprises et permettront également de s'hasarder à prévoir l'utilisation des méthodes étudiées sur le plan pratique.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Une exploration de la littérature permet de faire le point sur l'état des connaissances actuelles. Jusqu'à aujourd'hui, aucun lien n'a été fait entre l'utilisation des cellules dynamiques et la performance des entreprises travaillant en réseau. Ce chapitre est présenté en deux parties. La première partie traitera des cellules dynamiques dans les entreprises manufacturières; les facteurs de succès et conditions d'utilisation. La seconde partie tentera d'inventorier les systèmes de mesure de la performance dans les chaînes d'approvisionnement ainsi que les conditions pour qu'un réseau soit considéré comme performant. L'idée sera de voir les liens qui peuvent exister entre les deux principes et voir s'il est possible de les mettre en parallèle pour une utilisation plus pratique.

2.1 CELLULES DYNAMIQUES

Dans la littérature, les cellules dynamiques sont souvent désignées comme des DCMS. Cet acronyme signifie *Dynamic Cellular Manufacturing System* ou, en français, "Système de production en cellules dynamiques". Ce concept a été élaboré en 1995 par Rheault et al. (1995). Les auteurs affirment que l'environnement turbulent actuel fait en sorte qu'il devient impossible de produire selon un aménagement continu linéaire. La production en atelier augmente le poids des manutentions et par le fait même le temps de passage et la quantité d'inventaire d'encours. Afin d'équilibrer le ratio productivité/flexibilité, les cellules de production manufacturières sont introduites. Toutefois, le vieillissement de la cellule par la modification temporelle du mix-produit et de la quantité à produire rend rapidement les cellules désuètes et peu optimales. Les cellules virtuelles permettent de pallier à ce problème. Mieux encore, la reconfiguration physique des cellules permet de gagner davantage en productivité. Le DCMS est un système qui permet de regrouper les

machines en cellules physiques dans le cas où les déplacements sont économiquement justifiables et, sinon, le système utilise les cellules virtuelles qui, sans déplacement physique, utilise la technologie de groupe afin d'augmenter la productivité du plancher. L'article propose un guide (modèle mathématique) qui permet de modifier régulièrement la configuration du plancher de production afin de répondre rapidement à la demande du client malgré les changements et fluctuations du système. Le modèle tente de minimiser les coûts de production en établissant un compromis entre le temps de passage des produits, la manutention du matériel et l'inventaire d'encours.

2.1.1 Les modèles mathématiques

Suite au développement des cellules de production dynamiques, de nombreux auteurs se sont penchés sur l'implantation des DCMS. La majorité d'entre eux se sont concentrés sur l'élaboration de modèles mathématiques toujours plus complets et distinctifs.

Rheault et al. (1996) ont ajouté à l'utilisation des cellules virtuelles des DCMS. Le modèle proposé tente de minimiser le caractère financier de l'établissement des cellules dynamiques. Les auteurs font varier la capacité disponible des postes pour l'horizon concerné, le coût de manutention interzone, la planification et le contrôle du système dans le but de minimiser la somme des coûts marginaux.

Le modèle est ensuite repris par plusieurs auteurs, entre autres, Safaei et Tavakkoli-Moghaddam (2009). Dans le but de modéliser la réalité de manière plus représentative, les auteurs proposent de combiner la formation de cellules manufacturières et la planification de la production - c'est-à-dire la répartition des ressources dans le temps. L'objectif de la recherche est de développer un modèle mathématique intégré pour optimiser la formation de cellules sur plusieurs périodes et la planification de la production dans un DCMS. La résolution d'exemples numériques et l'analyse de sensibilité a permis d'évaluer l'effet du mix-produit et du volume à produire selon les périodes ainsi que de l'introduction de nouveaux produits sur la somme des coûts marginaux (opérations, manutention, reconfiguration et sous-traitance).

En 2011, Ghotboddini et al. (2011) proposent également un modèle mathématique, mais qui cette fois, est multi-objectif. Le modèle permet de faire simultanément le regroupement des pièces et des machines et l'assignation de la main d'œuvre dans le but de rendre le processus *lean* plus fluide, minimiser les coûts marginaux ainsi que maximiser le taux d'utilisation de la main d'œuvre.

Dans la même année, Li, Hu et Murata (2011) incluent l'incertitude dans le modèle mathématique. Les auteurs recherchent alors l'horizon de planification "optimale" qui permettra de maximiser l'effet positif de l'utilisation des cellules dynamiques.

Toujours dans l'objectif de rendre le modèle plus représentatif, Saxena et Jane (2011) se concentrent sur l'ajout de multiples autres variables dans la structure du DCMS. L'effet de la fiabilité des machines, la planification de la production, les contraintes des machines dans une même cellule, l'acquisition de machines et la reconfiguration sur plusieurs périodes est évalué au niveau de la somme des coûts marginaux.

Kia et al. (2012) proposent un modèle non-linéaire intégré qui permet de minimiser le coût total d'un système manufacturier dans un environnement dynamique. Le modèle est utilisé pour déterminer la configuration de cellules, la localisation des machines et la planification optimale pour tous les types de pièces pour chaque période de l'horizon de planification. La linéarisation du modèle s'est avéré NP-Complexe. Il n'a donc pas été possible de déterminer la solution optimale à l'aide de cette méthode, mais une estimation heuristique s'est avérée satisfaisante. Les auteurs incluent de nombreuses variables telles que les gammes de fabrication alternatives, la séquence d'opération, le temps d'opération, le volume des pièces produites, l'achat de machines, la duplication de machines, la capacité des machines, le fractionnement des lots de transfert, l'aménagement intracellulaire, l'aménagement intercellulaire et l'aménagement multi-lignes d'usines de surface identique. À la suite de leur travail, les auteurs ont formulé une liste relativement exhaustive des futures possibilités de recherche concernant les DCMS. Les éléments non-inclus dans le modèle sont les suivants : Inventaire entre les périodes; Sous-traitance partielle ou totale; Équilibrage de la charge de travail entre les cellules; Optimisation du

nombre de cellules créées; Utilisation des machines; Manutention du matériel en lots; Incertitude dans la demande des pièces; Disponibilité des machines; Coefficients de coûts; Optimisation multi-objective; Usines de surface inégales.

Soolaki (2012) propose ensuite d'ajouter l'effet de l'assignation des travailleurs par rapport à leurs compétences dans la modélisation d'un DCMS. Ce facteur est ajouté à l'effet de la planification de la production. Le modèle présenté a pour objectif de former les cellules dynamiques tout en tentant de minimiser simultanément la charge totale des cellules et la somme des coûts marginaux.

Paydar et al. (2013) reprennent la majorité des idées déjà présentées jusqu'à aujourd'hui. Ils incluent la planification de la production en multi-périodes, la séquence des opérations, les gammes de processus alternatives, l'aménagement intracellulaire, le système de reconfiguration dynamique, la duplication de machines, la capacité des machines, le fractionnement des lots de transfert et le flux de matériel entre les machines. Ils rajoutent toutefois des contraintes concernant la satisfaction de la demande, la grandeur des cellules, la disponibilité des machines, la capacité des machines, la conservation du flux de matière et la localisation des machines.

En 2013, Soolaki (2013) revient dans la modélisation des DCMS avec l'aspect de l'incertitude de l'environnement. Il incorpore une configuration robuste au modèle à l'aide de la théorie d'optimisation dans le but de générer des solutions robustes optimales. Il faut rappeler que le caractère robuste d'une optimisation est principalement relié à la flexibilité de l'optimisation, à l'imprécision ou l'incertitude des événements et à la répulsion du risque et de l'ambiguïté. L'idée de la robustesse est donc d'évaluer plusieurs scénarios possibles où la solution est jugée meilleure quelle que soit le scénario qui aura lieu.

Toujours dans l'idée de générer des modèles mathématiques robustes pour la génération de systèmes de production en cellules dynamiques (DCMS), Tavakkoli-Moghaddam et al. (2014) proposent un nouveau modèle qui, cette fois, ajoute l'incertitude au niveau du temps d'opération des pièces.

Plus les années avancent, plus les modèles mathématiques grossissent et tentent de représenter la réalité quotidienne des entreprises manufacturières. D'une fois à l'autre, le caractère financier demeure constant. L'idée est toujours d'améliorer sa productivité ainsi que sa flexibilité et ce, au moindre coût possible. D'un autre côté, en plus des coûts, on remarque que les auteurs se penchent de plus en plus sur la synchronisation des activités. Les modèles tentent d'élaborer une planification de la production par rapport à un horizon optimal dans un système de production constamment reconfigurable. Il faut donc comprendre que la reconfiguration du plancher est indissociable à la planification des activités. Aussi, dans les dernières années, il est possible de remarquer que l'incertitude et la variété des scénarios possibles ont pris une importance capitale. La robustesse de l'optimisation est désormais devenue inévitable si l'on désire représenter correctement la réalité vécue par les entreprises.

2.1.2 Comparaison des systèmes de production

L'intérêt de l'utilisation des cellules dynamiques n'est pas encore très répandu. On en parle dans la littérature, mais au niveau pratique, il y a un manque de transfert de connaissances. Étant un concept relativement nouveau, certains peuvent être intrigués au niveau de l'efficacité réelle des DCMS.

Darkov, et Naydenov (2011) ont écrit un article tentant de défendre la supériorité des systèmes de production en cellules virtuelles (VCMS) en comparaison aux autres systèmes de production, incluant les DCMS. L'idée de supériorité provient principalement du fait que les DCMS impliquent de travailler à l'encontre d'un paradigme de déplacer le produit et de proposer le déplacement des machines. D'un autre côté, les auteurs ont établi un tableau comparatif indiquant le système de production préférable à utiliser dépendamment du contexte manufacturier. Par manque de données statistiques, les auteurs n'ont pas été en mesure de prouver que les VCMS sont effectivement préférables aux DCMS sur le plan pratique.

Drolet, Marcoux et Abdul-Nour (2008) ont étudié l'effet du système de production sur la performance d'une entreprise. La performance était caractérisée par le temps de passage,

les encours, les retards ainsi que le coût marginal total. Les conclusions du rapport démontrent que les cellules dynamiques (DC) surpassent les *Job shop* (JS) et les cellules classiques (CC) sur presque tous les plans, principalement dans les environnements turbulents où on fabrique une variété de produits en petites quantités. Les cellules dynamiques minimisent également les effets négatifs de variables externes tels que le cycle de vie (moyenne et écart-type).

2.1.3 Facteurs de succès d'implantation

L'implantation des cellules dynamiques en milieu réel peut représenter un défi important. Certaines conditions doivent être respectées avant même le début de l'introduction de ce type de système de production. Dans la littérature, on ne trouve pas spécifiquement de facteurs critiques de succès (CSF) d'implantation des DCMS, mais il est possible d'en retrouver quelques-uns dans différents articles scientifiques.

Les cellules dynamiques, tel qu'elles ont été décrites, sont un outil de la production *lean*. Ali et Deif (2014) ont travaillé sur l'aspect Lean des entreprises. Les auteurs ont développé un modèle mathématique qui indique un "*Leaness score*" qui permet de s'identifier sur le plan *lean* et orienter ses actions futures. Le modèle fait ressortir que le fait de travailler sur l'ajustement des systèmes de temps de cycle dans le but de suivre un temps takt grâce au flux pièce-à-pièce augmentera la performance globale d'une usine, principalement dans un environnement hautement dynamique.

Yamchello et al. (2014) ont déterminé les facteurs critiques de succès (CSF) au niveau de l'implantation d'un système de production *lean*. L'établissement d'une revue de littérature a permis de recenser les principaux CSF d'implantation du *lean* dans le but d'aider les PME à réduire leurs coûts de production et améliorer leur efficacité afin de survivre au marché extrêmement compétitif et dynamique. Selon les auteurs, le manque d'engagement de la haute direction, les difficultés de changements culturels, le manque d'éducation et de formation des employés sont les facteurs qui ont le plus de chance de faire échouer l'implantation du *lean*. Voici la liste exhaustive des facteurs critiques de succès élaborée par Yamchello et al. (2014).

- Engagement de la haute direction
- Éducation et formation
- Intégration des employés
- Intégration des clients
- Intégration de la stratégie d'entreprise
- Intégration des fournisseurs
- Compétences en gestion de projet
- Fort leadership
- Sélection de projets
- Vision et objectifs clairs
- Communication
- Changement culturel
- Système de mesure
- Récompenses et reconnaissance

2.2 LES ENTREPRISES RÉSEAUX

L'idée de créer des ententes et partenariats d'affaires selon Poulin, Montreuil et Gauvin (1994) est principalement de se développer mutuellement et générer des bénéfices communs. Ces alliances stratégiques ont pour caractéristique de permettre aux entreprises concernées de réaliser des économies d'échelle (diminution des coûts/augmentation du chiffre d'affaire), maîtriser la complexité des processus et des marchés (exploitation d'actifs ou de connaissances), réagir plus vite au changement (délai de réaction), et augmenter sa flexibilité (accès aux ressources et adaptation aux agents externes). Il existe de nombreux autres avantages des réseaux, mais dans tous les cas, ces bénéfices affectent plus ou moins directement les quatre mentionnés ci-haut.

On ne se concentre désormais plus uniquement sur la performance interne d'une entreprise mais également sur l'efficacité globale du réseau tout entier (Poulin et al. 1994). Les

auteurs depuis les 20 dernières années tentent d'établir la meilleure manière d'évaluer et mesurer cette performance (Beamon, 1999; Gunasekaran et Kobu, 2007; Tan et al., 2007; McCormack et al., 2008; Martin et Patterson, 2009; Anvari et al., 2011; Shepherd et Günter, 2011).

Ip, Chan et Lam (2011) élaborent de leur côté un modèle mathématique qui permet de mesurer la performance et la stabilité des chaînes d'approvisionnement. Ils prouvent que l'efficacité et l'efficience d'un réseau sont basées sur 6 indicateurs. Ils dénotent notamment la fiabilité du produit, la satisfaction de l'employé, la satisfaction du client, la livraison à temps, la croissance des profits et l'efficacité opérationnelle. Ces facteurs ont été déterminés comme étant les plus significatifs au niveau de la performance de la chaîne d'approvisionnement.

Pour assurer le bon fonctionnement des chaînes d'approvisionnement, Yoon et al. (2002) abordent la nécessité de se développer au niveau de la technologie de l'information. Selon eux, l'utilisation conjointe d'un système informatique intégré permet d'améliorer significativement la performance du réseau. L'idée est que les entreprises puissent échanger des données et connaissances via une infrastructure informatique intégrée.

Kearney et Abdulnour (2004) ont rappelé l'importance d'une bonne communication entre les membres du réseau dans le but d'augmenter le niveau de qualité des entreprises. L'augmentation de la qualité est nécessaire pour demeurer compétitif sur le marché mondial. L'acquisition de l'expertise externe par le biais de l'échange de connaissances et de savoir-faire via le réseau est donc essentielle au développement mutuel des entreprises.

D'autre part, différents outils peuvent être utilisés pour optimiser la performance des chaînes d'entreprises. Feng et Zhang (2013) étudient l'impact de la conception modulaire sur l'efficacité des réseaux d'entreprises. Nécessairement, la conception modulaire impose un transfert du délai d'assemblage de l'aval vers l'amont de la chaîne. Les auteurs ont prouvé que le déplacement du délai d'approvisionnement en amont améliore toujours

l'efficacité d'un réseau centralisé, mais pas lorsque le réseau est décentralisé (aucun partage d'information).

De leur côté, Anvari et al. (2011) abordent la relation existant entre la performance des réseaux d'entreprises et le *lean manufacturing*. Alors que le *lean* se concentre sur l'optimisation de la production et la survie des entreprises dans un environnement dynamique mondialement compétitif, le management des chaînes d'approvisionnement se concentre sur le développement des niveaux stratégiques, tactiques et fonctionnels des entreprises. Or, la planification, la gestion des ressources humaines, la production et la livraison sont des processus inhérents à un réseau. Les auteurs démontrent que la mesure de la performance du réseau est un outil de base à l'implantation du *lean* dans le réseau tout entier.

Zhang et Qi (2013) ont ensuite étudié la relation entre les configurations des chaînes d'approvisionnement (*lean*, agile, *leagile* ou traditionnelle), les pratiques de la personnalisation de masse (production efficace et très flexible) et la performance des entreprises. Les résultats démontrent qu'une configuration *leagile* permet de rendre les pratiques de la personnalisation de masse plus bénéfiques pour la performance des entreprises.

Dans un même ordre d'idée, Purvis et al. (2014) élaborent une nouvelle taxonomie qui relie dynamiquement la flexibilité des vendeurs et des clients (chaîne d'approvisionnement) à l'aide de stratégies *lean*, agiles et *leagiles*. Dépendamment de la durée de vie des produits, la variation du mix-produit et du volume de production ainsi que la durée de vie du réseau, les auteurs proposent les configurations associées.

Christopher et Ryals (2014) étudient le passage d'une chaîne d'approvisionnement traditionnelle à une chaîne de demande. Les auteurs affirment que pour pouvoir effectuer cette transition, il ne faut pas seulement "suivre" le besoin du client, mais plutôt y "obéir". La valeur doit être (co)créée à partir du manufacturier et du client ensemble. Dans le but d'arriver à une chaîne de demande efficace, certains critères doivent être respectés :

l'intégration des entreprises dans l'établissement des prévisions et des pratiques de planification, le choix du canal et le meilleur moyen d'atteindre le client, la cocréation de valeur, le management de la chaîne basé sur la performance de la chaîne et non individuelle, le partage de valeur pour permettre de se concentrer également sur le développement commun.

À la lumière de toutes ces considérations, Bulsara et al. (2014) ont établi une revue de littérature qui a pour but de fournir systèmes de mesure de performance des chaînes d'approvisionnement. (SCPMS) ainsi que fournir une évaluation et classification critiques en matière de littérature des SCPMS. Cette revue doit également servir sur le plan pratique pour résoudre les problèmes stratégiques, tactiques et opérationnels rencontrés quotidiennement.

Les auteurs ont dénoté les caractéristiques préalables aux systèmes de mesure de performance (PMS). Ils parlent principalement de l'inclusion (mesure de tous les paramètres pertinents), l'universalité (utilisation possible dans plusieurs conditions différentes), la mesurabilité (possibilité de mesurer objectivement les paramètres) et la cohérence (mesures conséquentes avec les buts de l'organisation).

L'auteur a par la suite identifié 5 catégories de mesure de la performance des chaînes d'approvisionnement : Les ressources (qui inclut la somme des coûts marginaux et autres considérations financières), les extrants (qui incluent la réponse au client, la qualité, les quantités et les délais d'approvisionnement), la flexibilité (qui inclut les retards, les commandes en souffrance, la capacité à répondre et s'accommoder aux variations de demande, aux nouveaux produits, processus, design, marché, compétiteur, aux variations des fournisseurs, aux changements dans l'approvisionnement et aux problèmes de logistique), l'innovation (qui inclut l'exploration des nouvelles connaissances et découvertes) et finalement, La technologie de l'information (qui inclut les compétences, l'intégration et la flexibilité liées aux technologies de l'information).

2.3 CONCLUSION

En définitive, qu'importe que l'on traite des cellules dynamiques ou des entreprises réseaux, certaines idées reviennent. La liste des éléments conjoints à chaque concept est indiquée ici-bas.

- Accès aux connaissances et aux ressources
- Adaptabilité aux changements et fluctuations dans le système
- Besoin d'une bonne communication
- Minimisation des coûts totaux,
- Réponse plus rapide à la demande
- Efficacité opérationnelle
- Évaluation de la performance
- Fiabilité du système,
- Importance de la flexibilité
- Intégration de l'ensemble des acteurs et données du système
- Équilibre entre le système *lean* et agile
- Importance d'une bonne planification des activités
- Satisfaction du client
- Contrôle du système par des mesures de performance
- Habileté à s'adapter à un environnement dynamique, turbulent et incertain

2.4 MATRICE DE LA REVUE DE LITTÉRATURE

Dans le but d'avoir une vue d'ensemble des différents articles mentionnés et de leurs objectifs, variables et méthodologies respectifs, deux matrices sont présentées aux pages suivantes. La première matrice regroupe les articles concernant les cellules dynamiques alors que la seconde regroupe les articles traitant des entreprises réseaux.

Tableau 2-1 : Matrice synthèse des DCMS

Référence	Ali, R. M., Deif, A. M. (2014)	Darkov, I., Naydenov, P. (2011).	Drolet, J., Marcoux, Y., Abdounour, G. (2008).	Ghotboddini, M. M., Rabbani, M., Rahimian, H. (2011)
Objectifs	Présenter un modèle dynamique pour évaluer le degré de <i>leanness</i> dans les entreprises manufacturières.	Mettre en évidence 9 facteurs d'influence de succès d'implantation des cellules manufacturières virtuelles et classer les deux plus importants d'entre eux.	Comparer la performance entre les systèmes de production JS, CC et DC dans différentes conditions de production et environnement turbulent.	Concevoir un DCMS afin de minimiser le coût de réassignation de la main d'œuvre, le coût de l'équipement dans le temps, et maximiser le taux d'utilisation de la main d'œuvre.
VD	Niveau de service, Stock d'encours, Efficacité des équipements à partir d'un "leaness score"	Implantation pratique des VCMS réussie (l'idée est de déterminer un niveau critique numérique à atteindre pour assurer une implantation réussie)	Performance du système : Indicateurs = T. passage, Taux d'utilisation, Coût marginal total, WIP, Retard	Coût de réassignation de la main d'œuvre, Coût de l'équipement dans le temps, Taux d'utilisation de la main d'œuvre.
VI et Hypothèses	Application du flux pièce-à-pièce via le Takt time	Flexibilité spécifique de la machine, Variété des produits, Taille moyenne des lots, Quantité totale de machines, Spécialisation de l'unité de production, Capacité, Flexibilité des systèmes de manutention	Le coût de manutention, Séquence, grandeur des lots de transfert, Le type de système de production, le type de planification, l'horizon de planification, le nombre de produits dans le carnet de commande, la taille moyenne des commandes par produit, la durée totale du cycle de vie des produits, le délai de réaction	The part and machine grouping simultaneously with labor assignment
Méthodologie	Développement de modèles SD (system dynamics)	Regroupement de facteurs trouvés dans la littérature	Design expérimental et simulation	Programmation linéaire, Optimisation multi-objective
Méthodes de résolution	Résolution d'exemples numériques		ANOVA via SAS et ARENA	Approche de décomposition de Benders

Tableau 2-2 : Matrice synthèse des DCMS (suite)

Référence	Kia, R. et al. (2012)	Li, W., Hu, L., Murata, T. (2011)	Paydar, M. M., Saidi-Mehrabad, M., Kia, R. (2013)	Rheault, M., Drolet, J. R., Abdulnour, G. (1995).
Objectifs	Minimiser le coût total (de la manutention inter et intracellulaire, matériel et machine, achat de machines, frais généraux et le traitement des machines	Développer un modèle mathématique pour résoudre les problèmes de planification et la production dans un DCMS avec une demande incertaine.	Design un nouveau model intégré pour les systèmes de cellules de fabrication dynamiques à l'aide de la planification et des aménagements intracellulaires.	Proposer un modèle mathématique qui permet de répondre rapidement à la demande du client malgré les changements et fluctuations du système.
VD	Coût total	Planification de la production par période	Coût total de la manutention intercellulaire, manutention, intracellulaire, opération des machines, manutention des machines et reconfiguration des cellules, gestion et maintien d'inventaire	Compromis entre Temps de passage, manutention et inventaire d'encours - Coût de manutention de matériel et coût de relocalisation des machines
VI et Hypothèses	Gammes alternatives, Séquence d'opération, Temps d'opération, Volume des pièces produites, Achat et duplication de machines, Capacité des machines, lot splitting, aménagement intra et intercellulaire	Incertitude de la demande, Horizon de planification "optimale"	Planification de la production, séquence, gammes alternatives, aménagement intracellulaire, reconfiguration dynamique, duplication de machines, capacité des machines, lot splitting et le flux de matériel entre les machines.	Familles, Séquence, temps d'opération et date de livraison, Configuration, Temps de mise-en-cours, de configuration, de manutention, output du module. System monitoring
Méthodologie	Programmation linéaire	Modèle mathématique intégré non-linéaire mixte	Programmation stochastique, Théorie d'optimisation	C++
Méthodes de résolution	Résolution d'exemples numériques par Lingo Algorithme "simulated annealing" , Comparaison des méthodes	Résolution d'exemples numériques	Comprehensive integer linear programming model, Résolution d'exemples numériques	Heuristique de Burbidge, Simulation à événements discrets (1. Pire cas de turbulence possible, 2. Cas réel) à l'aide du logiciel ARENA.

Tableau 2-3 : Matrice synthèse des DCMS (suite)

Référence	Rheault, M., Drolet, J. R., Abdulnour, G. (1996).	Safaei, N., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2009).	Saxena, L. K., Jain, P. K. (2011)	Soolaki, M. (2012)
Objectifs	Proposer un modèle afin de minimiser les coûts de production à l'aide de l'utilisation des cellules dynamiques	Proposer un modèle mathématique intégré sur la formation de cellules dynamiques sur plusieurs périodes et la planification	Développer un modèle mathématique pour optimiser la formation de cellules dynamiques. L'objectif du modèle est de minimiser la somme des coûts divers.	Développer un modèle DCMS multi-objectifs qui intègre plusieurs périodes de planification, un système de reconfiguration dynamique et la disponibilité et l'assignation des travailleurs,
VD	Coûts totaux de manutention et reconfiguration	Mouvements des machines inter et intra cellulaire, Reconfiguration des machines, Sous-traitance partielle et coûts de maintien en inventaire.	Sommes des coûts divers	Variation de la charge totale des cellules, somme des coûts divers
VI et Hypothèses	Capacité disponible pour l'horizon concerné, coût de manutention interzone, temps d'opération, temps de mise-en-curse, temps de manutention, séquences d'opération, règles d'ordonnancement	Effet des compromis entre la production et les coûts de sous-traitance sur la reconfiguration des cellules de production dans un environnement dynamique. Mixte produit différent d'une période à l'autre.	Fiabilité des machines, Planification de la production, Contraintes des machines dans une même cellule, Acquisition de machines, Reconfiguration sur plusieurs périodes	Planification de la production, Assignation des travailleurs (par compétences)
Méthodologie	Modèle mathématique en programmation binaire et QAP	Modèle mathématique intégré	Modèle mathématique mixte-intégré non-linéaire	Programmation linéaire, Algorithme d'optimisation, Loi de Pareto
Méthodes de résolution	Design expérimental résolu par simulation	Résolution d'exemples numériques et analyses de sensibilité	Résolution d'exemples numériques	Résolution de problèmes numériques.

Tableau 2-4 : Matrice synthèse des DCMS (suite)

Référence	Soolaki, M., Izadi, A. (2013)	Tavakkoli-Moghaddam, R., Sakhaei, M., Vatani, B. (2014)	Yamchello, H. T. and al. (2014)	
Objectifs	Fournir un modèle robuste d'optimisation pour le design des cellules de fabrication dans un environnement incertain.	Minimiser les manutentions inter et intracellulaires, la quantité d'inventaire, les commandes en souffrance et les coûts de reconfiguration	Établir une revue de littérature sur les Facteurs critiques de succès (CSFs) dans l'implantation de la production lean dans les PME	
VD	Coûts des machines, coûts des opérations, coûts de la production interne, coûts de manutention intercellulaire, coûts de commandes en souffrance, coûts de maintien en inventaire, coûts de sous-traitance	Manutention inter et intracellulaires, quantité d'inventaire, commandes en souffrance, coûts de reconfiguration	Succès d'implantation de la production lean	
VI et Hypothèses	Coûts des paramètres, Fluctuation de la demande [incertitude], sûrement d'autres....	Planification de la production (environnement dynamique), Temps d'opération (incertains) des pièces, Formation cellulaire, Aménagement intercellulaire, Incertitude	Entre autres, manque d'engagement de la haute direction, des changements culturels, de l'éducation et de la formation	
Méthodologie	Programmation stochastique, Théorie d'optimisation	Approche robuste d'optimisation	Établissement d'une revue de littérature	
Méthodes de résolution	Programmation linéaire mixte-intégrée, Comparaison des résultats dans la réalisation de test numériques dans différentes problématiques	Résolution d'un exemple numérique pour trouver une solution optimale	Recherche d'articles dans des journaux de recherche.	

Tableau 2-5 : Matrice synthèse des entreprises réseaux

Référence	Anvari, A. and al. (2011)	Beamon, B. M. (1999)	Bulsara, H. P., Qureshi, M. N., Patel, H. (2014)	Christopher, M.; Ryals, L. J. (2014)
Objectifs	Établir le pont entre le lean et la chaîne d'approvisionnement et créer un système de mesure de la performance dans la gestion de la chaîne d'approvisionnement pour aider les prises de décision et diriger le système vers une production lean.	Présenter une vue d'ensemble et une évaluation des systèmes de performance des chaînes d'approvisionnement. Proposer un guide de sélection du système de mesure de performance pour les chaînes d'entreprises manufacturières.	1. Fournir une revue de littérature des systèmes de mesure de performance des chaînes d'approvisionnement. (SCPMS). 2 Fournir une évaluation et classification critiques des SCPMS. 3 Aider les gestionnaires praticiens à comprendre les SCPMs pour résoudre leurs problèmes stratégiques, tactiques et opérationnels.	Remodeler les chaînes d'approvisionnement en chaînes de demande dans le but de réduire les gaspillages et l'obsolescence dans les chaînes d'approvisionnement
VD	Performance de la chaîne d'approvisionnement		Performance des chaînes d'approvisionnement (comportement des acteurs, opérations, performance globale)	Inventaire, Rapidité de réponse aux nouvelles technologies, Amélioration du flux clients, Coût total
VI et Hypothèses	Planification, Ressources humaines, Fabrication de produits, Livraison			Utilisation des caractéristiques lean et agiles
Méthodologie	Création d'un de système de mesure de la performance de la chaîne d'approvisionnement	Établissement d'une revue de littérature, et création d'un guide pratique de sélection du système de mesure de performance	Établissement d'une revue de littérature	Revue du développement des chaînes de demande, des relations entre le marketing et la gestion de la chaîne da les organisations
Méthodes de résolution			Recherche d'articles dans des journaux de recherche.	Formulation d'un agenda de recherche interfonctionnel

Tableau 2-6 : Matrice synthèse des entreprises réseaux (suite)

Référence	Feng, T., Zhang, F. (2013)	Gunasekaran, A., Kobu, B. (2007)	Ip, W. H., Chan, S. L., Lam, C. Y. (2011)	Kearney, S., Abdul-Nour, G. (2004)
Objectifs	Évaluer l'impact de la structure modulaire sur la performance des chaînes d'approvisionnement.	Développer des mesures clés de performance pour les chaînes d'approvisionnement et les opérations logistiques dans le but d'aider à augmenter la compétitivité des organisations.	Proposer une approche intégrée pour modéliser et mesurer la performance et la stabilité des chaînes d'approvisionnement par l'utilisation de la dynamique des systèmes (SD) et la moyenne mobile intégrée autorégressive (ARIMA)	Développer une approche étape par étape pour aider les PME à atteindre un niveau de qualité supérieur
VD	Efficacité de la ligne : Coût pour le manufacturier, Coût pour le fournisseur, Coût pour la chaîne d'approvisionnement	Mesures clefs de performance pour les chaînes d'approvisionnement et les opérations logistiques	Performance des chaînes d'approvisionnement, Stabilité de la chaîne d'approvisionnement	Niveau de qualité des entreprises
VI et Hypothèses	Centralisation des composantes des fournisseurs (utilisation de modules), Changements dans les temps de production		Fiabilité du produit, Satisfaction des employés, Satisfaction des clients, Livraisons à temps, Croissance des profits et efficacité du travail.	
Méthodologie	Programmation stochastique, Théorie d'optimisation	Sondage de la littérature et quelques cas d'expériences vécus.	Développement de modèles SD (Système de moyenne mobile intégré).	
Méthodes de résolution	Résolution d'exemples numériques		Étude de cas pour validation du modèle	

Tableau 2-7 : Matrice synthèse des entreprises réseaux (suite)

Référence	Martin, P.R., Patterson, J.W. (2009)	McCormack, K. and al. (2008)	Purvis, L., Gosling, J., Naim, M. M. (2014)	Shepherd, C., Günter, H. (2011)
Objectifs	Établir le pont entre les performances financières et la chaîne d'approvisionnement et investiguer les systèmes de mesure de la performance et déterminer les plus utiles	Explorer la relation entre la maturité et la performance de la chaîne d'approvisionnement.	Proposer une nouvelle taxonomie qui relie de manière dynamique la flexibilité des vendeurs et des clients à l'aide de stratégies lean, agiles et leagiles. Fournir des méthodes pour établir l'équilibre entre les sources de flexibilité et étudier les compromis impliqués.	Fournir une taxonomie des mesures de performance suivit d'une évaluation critique des systèmes de mesure dans le but d'évaluer la performance des chaînes d'approvisionnement.
VD	Performance des entreprises	Performance globale de la chaîne	Flexibilité de la chaîne d'approvisionnement	Performance des chaînes d'approvisionnement
VI et Hypothèses	Systèmes de mesures de performance tels que : Niveau d'encours, Temps de cycle, etc.	Processus des chaînes d'approvisionnement tel que la maturité du processus de livraison	Combinaisons de stratégies-client-vendeur utilisées, Flexible, Lean, Leagile	
Méthodologie		Évaluation quantitative basée sur des sondages.	Étude de cas	Établissement d'une revue de littérature
Méthodes de résolution		Analyse statistique	Étude de cas de deux détaillants spécialistes en mode d'un réseau d'approvisionnement aux Royaume-Uni.	Évaluation critique des systèmes étudiés

Tableau 2-8 : Matrice synthèse des entreprises réseaux (suite)

Référence	Tan, Y., Ma, S. H., Gong, F. M. (2007)	Yoon, T. and al. (2002)	Zhang, M., Qi, Y. (2013)	
Objectifs	Examiner la performance des chaînes d'approvisionnement via la qualité du service en étudiant l'effet de la production, la flexibilité et la distribution.	Établir un lien entre la production virtuelle via un réseau informatique, où toutes les entreprises peuvent échanger des connaissances et information afin d'établir l'infrastructure de la technologie de l'information en entreprise.	Examiner les impacts des différentes stratégies de chaînes d'approvisionnement sur les pratiques de la production de masse personnalisée et sur la performance des entreprises.	
VD	Performance des chaînes d'approvisionnement via la qualité du service		Performance opérationnelle	
VI et Hypothèses	Production, la flexibilité et la distribution		Stratégies renseignement, de configuration technologie de chaîne, flexibilité d'approvisionnement et processus de la chaîne d'approvisionnement	
Méthodologie	Questionnaire par sondage, analyse des réponses et modélisation par structure d'équation (SEM)	Démarrage d'un projet stratégique pour mettre les industries et universités en relation	Sondage, configurations, Développement de chaîne de d'approvisionnement	
Méthodes de résolution	Étude empirique et son analyse	Mise en œuvre d'une expérience pratique	Utilisation de l'analyse par regroupement	

2.5 MODÈLE DE RECHERCHE – CADRE CONCEPTUEL

Afin de bien saisir le concept ralliant les cellules dynamiques aux entreprises travaillant en réseau, il peut être intéressant d'établir un cadre conceptuel.

Partant du modèle de chaîne logistique élaboré par Mentzer et al. (2001), il sera possible de construire le cadre conceptuel. Les auteurs avaient pour objectif de développer une définition concrète de la gestion de chaîne d'approvisionnement à partir d'une revue de littérature exhaustive sur ce propos. Ces derniers défendent que la gestion et l'intégration de la chaîne d'approvisionnement est essentielle à la performance des entreprises. Selon eux, les départements de l'ensemble de la chaîne sont reliés et interdépendants. Les auteurs dénotent notamment la R&D, l'ingénierie, les ventes, la logistique, le service à la clientèle et la production. La figure 2-1 suivante expose un résumé des différents acteurs de la chaîne, des interrelations entre ces derniers, du flux des produits, services et informations et des avantages d'une gestion efficace de la chaîne d'approvisionnement.

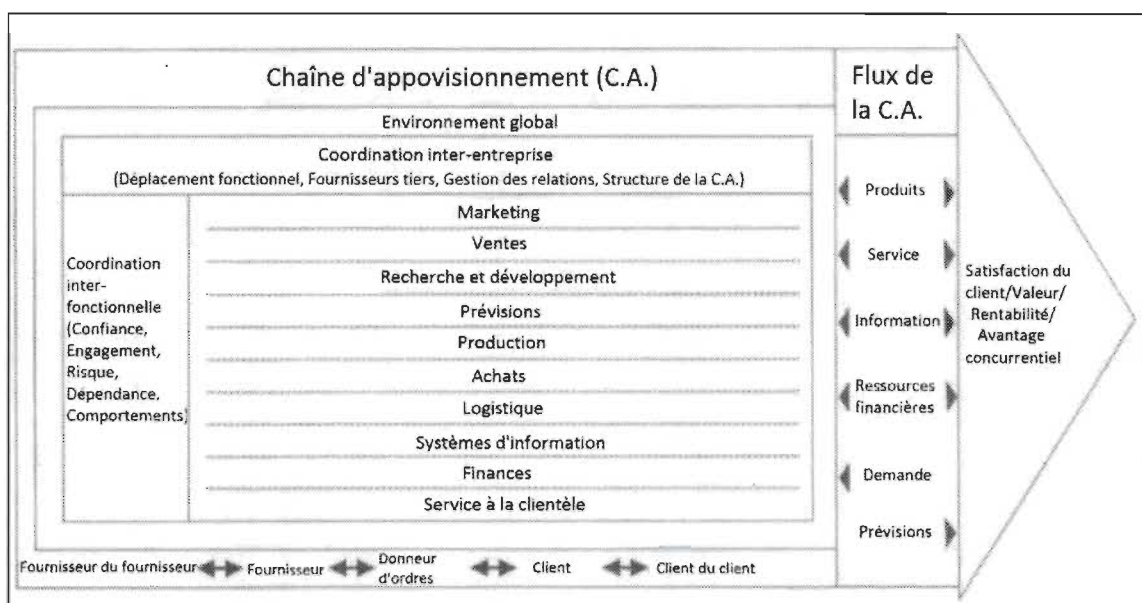


Figure 2-1 : Adapté de la représentation de la gestion de chaîne d'approvisionnement selon Mentzer et al. (2001)

L'étude actuelle incorpore plusieurs volets abordés dans l'article de Mentzer et al. On parlera, entre autres, des volets « Production », « Ventes », « Recherches et développement », « Prévisions », « Achats », « Logistique », « Système d'information » et « Service à la clientèle ».

Tout d'abord, les cellules dynamiques représentent un système de production en soit. Celui-ci étant, à prime abord, à la fois efficace et flexible. Étant efficace, la production du fournisseur pourra être faite à moindres coûts. Étant flexible, le donneur d'ordre pourra commander de petites quantités sans affecter négativement la production du fournisseur.

À partir des prévisions de ventes du donneur d'ordre, le fournisseur pourra se préparer à produire les quantités demandées au moment voulu.

Dans un contexte de réseau, la recherche et développement peut et doit se faire en considérant tous les acteurs de la chaîne. Ceci permettra d'assurer une meilleure fluidité, une meilleure qualité et un meilleur coût pour tous les acteurs, incluant le client final. Le système d'information est d'ailleurs important entre tous les partis pour les mêmes raisons.

Aussi, un produit créé et mis en marché avec la participation de tous les acteurs du réseau assurera une meilleure connaissance du produit, une responsabilisation et un gage de qualité. Ceci facilitera notamment le service à la clientèle et permettra d'imputer les erreurs aux bonnes personnes. L'implication des acteurs dans la chaîne est essentielle au bon fonctionnement de la production interne de chacun.

Un donneur d'ordre qui conçoit ses produits à l'aide d'une structure modulaire peut faciliter la production autant au niveau des méthodes de fabrication et méthodes de conception et assure également une qualité supérieure et un temps d'opération plus précis et plus stable. Il pourra de surcroît se spécialiser dans sa force principale, à savoir la conception et l'assemblage final de ses produits et éventuellement transférer la production de certains modules à l'externe. C'est à ce niveau que les cellules dynamiques peuvent devenir intéressantes; dans un contexte de spécialisation en réseau. Il conviendra enfin de

mentionner que la conception modulaire a été notée comme étant un facteur de succès à l'utilisation des cellules dynamiques.

La figure 2-2 suivante expose la portée de l'étude en considérant les concepts étudiés.

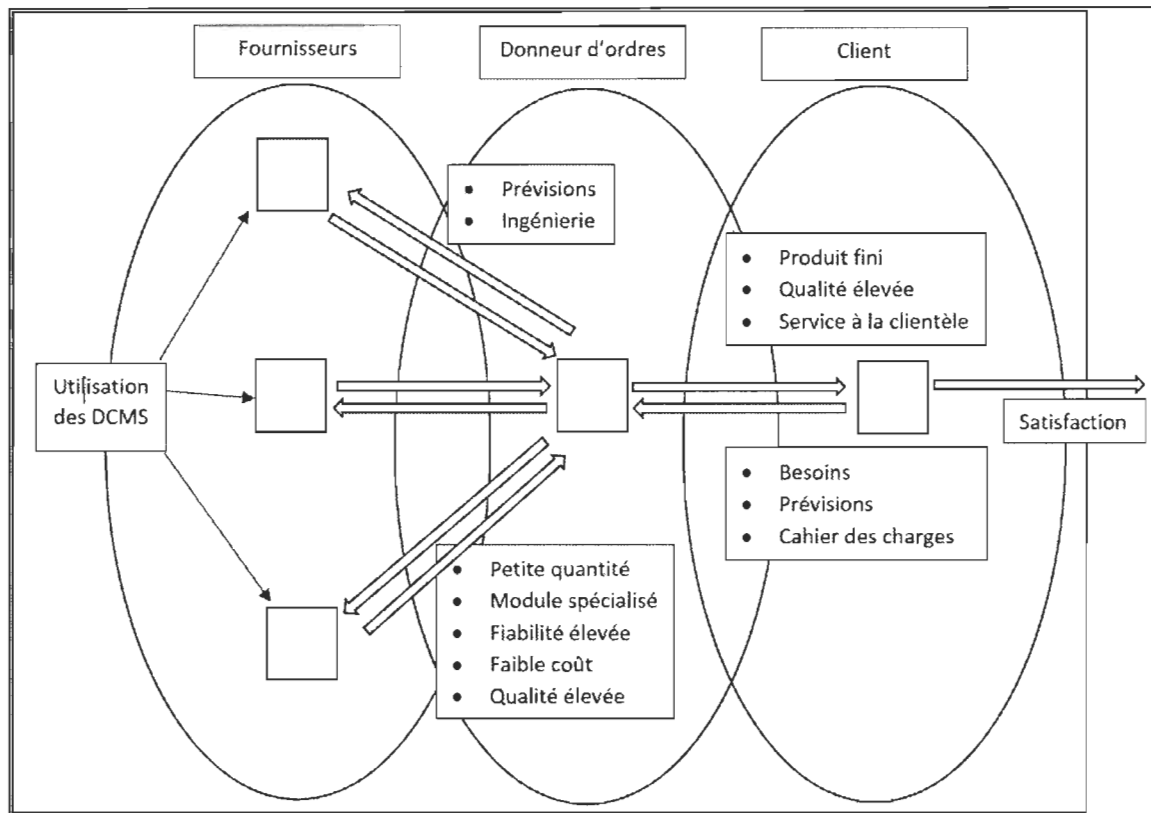


Figure 2-2 : Cadre conceptuel de l'étude

2.6 EXPÉRIENCE TERRAIN

Dans le cadre d'un stage Mitacs Accélération, il a été possible d'implanter le concept des cellules dynamiques en situation réelle. La littérature décrit de nombreux concepts et notions théoriques, mais il peut être intéressant de tester ces concepts directement sur le terrain. Plusieurs facteurs de succès ont pu être notés au cours du stage. Ils seront discutés plus loin dans le chapitre 5.

Dans le cas à l'étude, il a pu être possible de considérer que l'entreprise en elle-même formait un réseau. Deux lignes mixtes étaient alimentées d'options modulaires assez standards, mais dont la quantité et la composition variaient d'une commande à l'autre. L'entreprise fabriquait des appareils électromécaniques. L'assemblage final était utilisé pour le montage de la base de la machine ainsi que l'intégration des modules sur la machine. En amont se trouvaient les cellules qui fabriquaient les modules.

Chaque cellule était adaptée à la fabrication de certaines options précises. Ces options pouvaient varier quelque peu, mais étaient généralement assez standards. Certaines composantes revenaient à chaque montage. Elles étaient donc gérées en kanban. Celles qui étaient plus occasionnelles étaient gérées en kits. Un employé dédié à l'alimentation préparait les kits et les acheminait directement aux cellules. C'est également lui qui remplissait les kanbans.

L'expérience terrain permet souvent de confirmer, infirmer et adapter la théorie. Dans le cas actuel, ce dernier a permis de déterminer plusieurs facteurs qui facilitent l'implantation d'un système de cellules dynamiques. Certaines données du cas seront également utilisées pour tester différents scénarios qui permettront d'optimiser la performance du réseau à l'étude.

CHAPITRE 3

MÉTHODOLOGIE DE LA RECHERCHE

En regroupant les articles en fonction des auteurs et des différentes variables, il a été possible de construire les tableaux 3-1 et 3-2 suivants. Le tableau 3-1 regroupe les similarités entre les variables dépendantes chez les différents auteurs. Le tableau 3-2 a le même rôle mais pour les variables indépendantes.

Tableau 3-1 : Variables dépendantes en fonction des auteurs

Auteurs	Assignation de la main d'œuvre	Commandes en souffrance (et taux de service)	Coût de l'équipement dans le temps	Coût de mise en course	Coût de perte de temps de production	Coût d'outillage	Coûts de maintenance	Coûts de reconfiguration	Coûts de sous-traitance	Coûts d'opération	Efficacité globale des équipements	Niveau de qualité de la main d'œuvre	Quantité en inventaire	Somme des coûts	Taux d'utilisation de la main d'œuvre	Taux d'utilisation des cellules	Temps de passage	Valeur temporelle de l'argent
Ali, R. M., Deif, A. M. (2014)	-	-	-	-	-	-	X	X	X	X	-	-	-	X	-	-	-	-
Drolet, J., Marcoux, Y., Abduinour, G.	-	-	-	-	-	-	X	X	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-
E. Shahbazi (2010)	-	-	-	-	-	-	X	X	-	X	-	-	-	X	-	-	-	X
G. Egilmez et al. (2014)	X	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-	-
Li, W.; Hu, L.; Murata, T. (2011)	-	X	-	-	-	-	X	X	-	-	-	-	X	X	-	-	-	-
M.M. Ghorboddini, M. Rabbani et H. Rahimian (2011)	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	X	-	-	-	-	-
N. Safaei et R. Tavakkoli-Moghaddam (2009)	-	X	X	-	-	-	X	-	X	X	-	-	X	X	-	-	-	-
Paydar, M. M.; Saldi-Mehrabad, M.; Kia, R. (2013)	-	-	-	-	-	-	X	X	-	X	-	-	X	X	-	-	-	-
R. Kia et al. (2012)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	X	-	-
Rheault, M.; Drolet, J. R.; Abduinour, G. (1995)	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X	-	-	X	X	-	-	-	-
Rheault, M.; Drolet, J. R.; Abduinour, G. (1996)	-	-	-	-	-	-	X	X	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-
Saxena, L. K.; Jain, P. K. (2011)	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-
Soolaki, M. (2012)	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-	-	-	X	X	-	-	X	-
Soolaki, M.; Izadi, A. (2013)	X	-	-	-	-	-	X	X	-	X	-	X	-	X	-	X	-	-
Tavakkoli-Moghaddam, R.; Sakhrati, M.; Vatani, B. (2014)	-	X	-	-	-	-	X	X	-	X	-	-	X	X	-	X	X	-
V. Deljoo et al. (2010)	-	-	X	-	-	-	X	X	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-

Tableau 3-2 : Variables indépendantes en fonction des auteurs

Auteurs	Achat, vente, duplication de machine	Aménagement intercell	Aménagement intracell	Capacité des machines ou cellules	Compétences des employés	Délai ou coût de Manutention	Embauche et licenciement	Type de Planification, Équilibrage des lignes	Fiabilité des machines	Grandeur des lots	Incertitude	Le type de système de production	L'horizon de planification (en semaines)	Demande (Mix-produit, Volume)	Niveau de risque	Séquence d'opérations, Gammes alternatives	Sous-traitance de pièces	Temps de mise-en-cours	Temps d'opération
Ali, R. M., Deif, A. M. (2014)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	X
Drolet, J., Marcoux, Y., Abdulnour, G. (2006)	-	X	-	X	-	X	-	X	-	X	-	X	X	X	-	X	-	-	X
E. Shahbazi (2020)	X	X	X	X	-	X	-	-	-	-	-	-	X	X	-	-	-	-	-
G. Elgimez et al. (2014)	-	X	X	X	X	-	X	-	-	-	X	-	-	X	X	X	-	-	X
Li, W.; Hu, L.; Mureta, T. (2011)	-	X	Y	-	-	-	-	X	-	-	X	-	X	-	-	-	-	-	-
M.M. Ghotboddini, M. Rabbani et H. Rahimian (2011)	X	X	X	X	-	X	X	-	-	X	-	-	X	X	-	X	-	-	X
M. Saei et R. Tavakkoli-Moghaddam (2009)	X	X	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-	X	-	X	X	-	-
Paydar, M. M., Saidi-Mehrabad, M., Kia, R. (2013)	X	X	X	X	-	-	-	X	-	X	-	X	-	-	-	X	-	-	-
R. Kia et al. (2012)	X	X	X	X	-	-	-	-	-	X	-	-	-	X	-	X	-	-	X
Rheault, M.; Drolet, J. R., Abdulnour, G. (1995)	-	X	-	X	-	X	-	-	-	X	-	-	-	-	-	X	-	X	X
Rheault, M.; Drolet, J. R., Abdulnour, G. (1996)	-	X	-	X	-	X	-	X	-	X	-	-	X	X	-	X	-	X	X
Saxena, L. X., Jain, P. K. (2011)	X	X	X	X	-	-	-	X	X	X	-	-	X	X	-	X	X	-	-
Sociński, M. (2012)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sociński, M.; Izadi, A. (2013)	-	X	-	-	-	-	-	-	-	-	X	-	-	X	-	-	-	-	-
Tavakkoli-Moghaddam, R., Seikhali, M., Vafaei, B. (2014)	-	X	-	-	-	-	-	X	-	-	X	-	-	-	-	-	-	-	X
V. Deljoo et al. (2020)	X	X	-	X	-	X	-	-	-	X	-	-	X	X	-	X	-	-	X

Une analyse des différentes variables abordées dans les articles a permis de les regrouper par thèmes et en choisir 6 qui seront étudiées plus largement dans cette recherche. Le diagramme d'Ishikawa a permis de les disposer de la façon suivante.

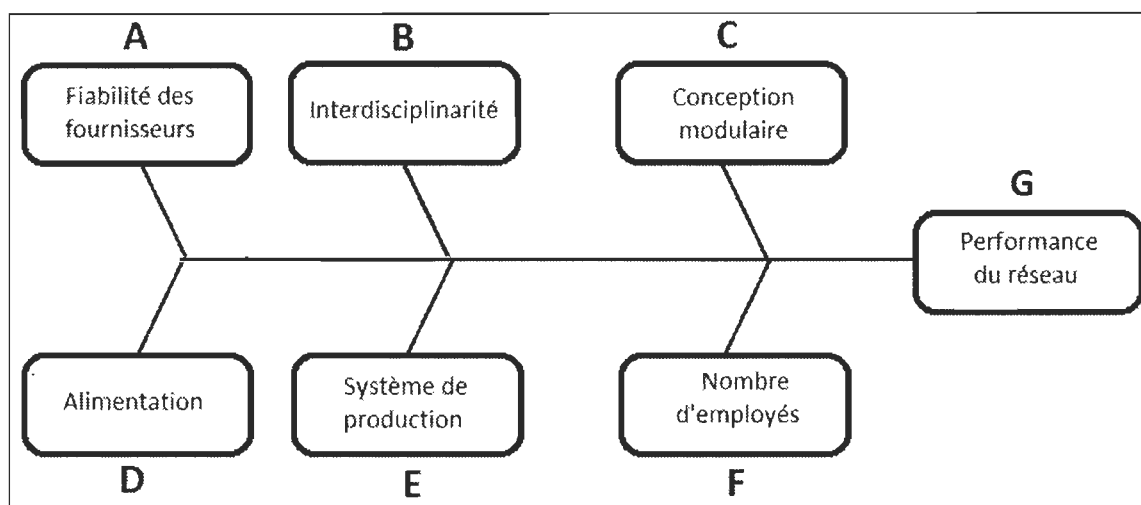


Figure 3-1 : Diagramme d'Ishikawa

Il est possible de constater à l'extrême droite de la Figure 3-1 l'objectif de la recherche actuelle. Il s'agit de la performance du réseau d'entreprises; la performance pouvant être mesurée par le temps de passage, le délai de réaction, le nombre d'encours ainsi que le ratio ventes/nombre d'employés. L'objectif principal de cette recherche est de voir l'effet des cellules dynamiques (E) sur la performance des entreprises réseaux. Toutefois, les réseaux font face à différentes conditions environnementales toujours plus dynamiques et incertaines. Plusieurs scénarios seront alors étudiés dans le but de vérifier l'impact des différents paramètres sur la réponse, mais également pour y voir l'interaction entre les facteurs.

3.1 CHOIX DES VARIABLES ET DES NIVEAUX

Pour l'étude actuelle, la fiabilité des fournisseurs (A), l'interdisciplinarité (B), la conception modulaire (C), le système d'alimentation (D), le système de production (E) ainsi que le nombre d'employés (F) seront les facteurs pour lesquels leur impact respectif sur la réponse sera vérifié. Il importera ainsi de déterminer dans quelle mesure ces paramètres affectent les résultats afin qu'au final, il soit possible de déterminer la ou les meilleure(s) combinaison(s) de facteurs qui optimiseront les réponses mesurées.

Le design expérimental (DOE) couplé à la simulation Monte-Carlo est choisi comme méthodologie dans le but de faire ressortir un maximum d'information des tests. Il est intéressant de connaître l'effet des facteurs séparément, mais le DOE permet de faire ressortir l'effet des interactions entre les facteurs - effet qui est régulièrement négligé, mais qui peut avoir une influence importante. Le design expérimental permet une connaissance approfondie d'un processus et de la variation des différents facteurs ainsi que de leurs interactions.

Le design expérimental sera donc l'outil de modélisation du système à traiter. L'analyse de la variance permettra de déterminer s'il existe effectivement des relations significatives entre les variables indépendantes, les interactions et la réponse.

À la suite de l'expérimentation, une analyse rigoureuse suivra au chapitre 4 pour déterminer la combinaison de facteurs qui répondra à l'objectif fixé initialement. Une interprétation des résultats suivra dans ce même chapitre. À la Figure 3-2, il est possible de voir la réponse ainsi que les différents facteurs et leurs niveaux respectifs.

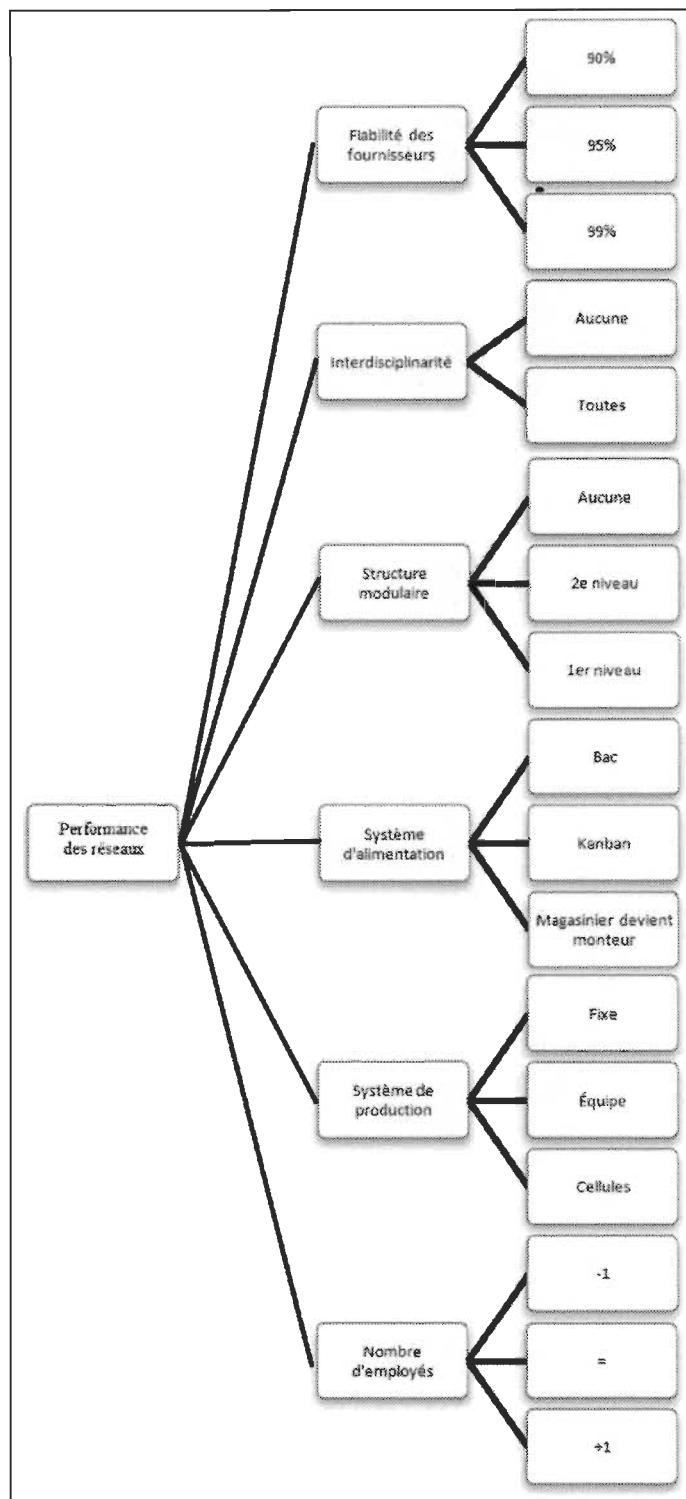


Figure 3-2 : Réponse, facteurs et niveaux

3.2 HYPOTHÈSES STATISTIQUES

Afin que les résultats qu'apportera cette expérience puissent être fiables, il est important de s'assurer que les comparaisons sont bonnes et que le minimum de facteurs externes ne viennent influencer la réponse. Une liste de facteurs qui pourraient influencer la réponse a été élaborée lors de la revue de littérature. Ces derniers demeureront fixes et la manière dont ils seront contrôlés sera discutée plus loin (Hypothèses limitatives). Il est néanmoins important d'énumérer les hypothèses statistiques qui seront vérifiées lors de l'expérience.

- Hypothèse 1 : La fiabilité des fournisseurs (A) a un impact sur la performance des entreprises réseaux.

Le pourcentage de livraison à temps, le délai d'approvisionnement ainsi que la qualité des pièces acheminées sont critiques au bon fonctionnement de l'entreprise. La performance peut être directement affectée par une telle variable. Il pourra être intéressant de tester l'impact d'une fiabilité entre 90 et 99% afin de voir s'il y a une différence significative sur la performance globale du réseau.

- Hypothèse 2 : L'interdisciplinarité (B) est un élément clé en fabrication pour éviter d'être dépendant de quelques employés clés, mais à quel point est-il nécessaire que tout le monde sache faire le même travail ? On affirme alors que les compétences des employés pourront avoir un impact sur la performance d'un réseau.

- Hypothèse 3 : La conception modulaire (C) favorise la performance des chaînes d'approvisionnement.

Assembler une 100% des composantes d'un produit représente un temps d'assemblage important. Cela oblige également à gérer plus de pièces. Assembler des sous-modules qui composent les modules principaux (2e niveau de nomenclature) pourra être à la fois un gain de temps, de qualité et de gestion d'inventaire. Assembler directement des modules principaux (1er niveau de

nomenclature) pourra avoir un impact encore plus important et permettra de créer des lignes mixtes où peuvent passer plusieurs produits différents.

Drolet et al. 2008 ont prouvé l'intérêt de la structure modulaire dans leur article. Il sera toutefois intéressant de vérifier l'impact de la conception modulaire dans différents contextes de réseau. On mentionnera également que la variabilité de la demande en termes de mix-produit est directement corrélée à une structure modulaire. De base, la structure modulaire prend pour hypothèse que l'indice de similarité entre les commandes est élevé. Plus les produits sont standardisés, plus il est facile d'implanter la conception modulaire. D'un autre côté, si les produits sont trop différents les uns des autres, la conception modulaire sera impossible. Du coup, il est possible de représenter la variabilité du mix-produit via la présence et le niveau de conception modulaire dans un réseau.

- Hypothèse 4 : Le système d'alimentation (D) a un impact sur la performance global de la chaîne.

Un employé dédié à l'alimentation pourra s'assurer que les monteurs ne manquent pas de pièces pour produire. Il travaille en parallèle avec la production pour que le goulot arrête le moins possible. Il convient toutefois de se demander si la ressource utilisée pour l'alimentation, déplacée au montage, pourra affecter positivement la performance du réseau.

- Hypothèse 5 : Le système de production (E) occasionnera un effet significatif sur la performance des entreprises réseaux.

Il s'agit là de l'hypothèse principale de la recherche. L'idée est d'évaluer l'effet des cellules dynamiques sur le réseau en comparaison aux autres systèmes de production.

- Hypothèse 6 : Le nombre d'employés (F) occasionnera un effet significatif sur la performance des entreprises réseaux.

L'idée ici est surtout de voir l'impact qu'aura l'ajout et du retrait de capacité. Ultimement, il sera intéressant de voir la production maximale que pourra effectuer une capacité égale, inférieure et supérieure à celle actuelle.

3.3 HYPOTHÈSES LIMITATIVES

Comme la recherche actuelle ne se concentre que sur l'effet des 6 facteurs mentionnés plus haut, il est important de fixer les autres variables qui pourraient fausser les données. La liste des hypothèses limitatives est la suivante.

- Hypothèse A : La communication entre les différents partis est jugée optimale
- Hypothèse B : Il y a un bon partage des connaissances et les alliances clients-fournisseurs sont saines
- Hypothèse C : La logistique interne est optimale et négligeable dans cette étude
- Hypothèse D : Les machines sont considérées fiables et bien maintenues
- Hypothèse E : Les entreprises du réseau utilisent les outils de base de la PVA
- Hypothèse F : Il y a une forte implication du personnel dans la culture du réseau
- Hypothèse G : La planification est optimale en fonction du système de production et de la demande
- Hypothèse H : L'horizon de planification du réseau est relativement court, ce qui amène à devoir avoir un temps de réaction court.

3.4 MODÈLE MATHÉMATIQUE

L'équation qui représente le modèle d'expérience est la suivante :

Équation 3-1 : Modèle mathématique de l'expérience

$$Y_{ijklmno} = \mu + A_i + B_j + C_k + D_l + E_m + F_n + \varepsilon_{o(ijklmn)}$$

Où

$Y_{ijklmnop}$: La réponse mesurée

μ : La moyenne des réponses mesurées

A_i : Le niveau i de la probabilité de livraison à temps

B_j : Le niveau j de l'interdisciplinarité des employés

C_k : Le niveau k de la conception en structures modulaires

D_l : Le niveau l du système d'alimentation

E_m : Le niveau m du système de production utilisé

F_n : Le niveau n du nombre d'employés disponibles

$\varepsilon_{o(ijklmn)}$: L'erreur expérimentale à chaque combinaison ijklmn

Il est donc possible de résumer ces variables et leurs valeurs respectives dans le tableau 3-3 suivant:

Tableau 3-3 : Variables et leurs niveaux respectifs

Variable	Niveau		
	0	1	2
Livraison à temps	0,9	0,95	0,99
Interdisciplinarité	Non interdisciplinaire	-	Interdisciplinaire
Structure modulaire	Aucun	2e niveau BOM	1er niveau BOM
Alimentation	Bac	Kanban	Ressource de plus au montage
Type de production	Fixe	Équipe	Cellule
Nombre d'employés	-1	=	1

3.5 PLAN D'EXPÉRIENCE L18

Un plan Taguchi L18 sera utilisé en premier temps pour l'expérience. Ceci permettra de détecter l'effet des facteurs les plus significatifs. Un plan complet sera ensuite effectué pour analyser l'effet des facteurs trouvés significatifs et leurs interactions.

Dans le plan L18, 18 expériences seront effectuées avec 5 répliques chacune. Le nombre de répliques permettra plus de précision et de robustesse.

Le plan L18 a été choisi en raison des 5 facteurs à 3 niveaux et d'un facteur à 2 niveaux. Puisque le plan L18 peut évaluer jusqu'à 8 facteurs et que 6 sont à l'étude, les colonnes 5 et 8 seront utilisées pour évaluer l'erreur expérimentale. Le tableau 3-4 présente le plan d'expérience qui sera utilisé pour la première partie de la collecte de données. Les expériences seront menées par simulation à événements discrets à l'aide du logiciel Rockwell Arena.

Tableau 3-4 : Plan Taguchi L18

Expérience	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	2	2	2	2	2	2
3	1	1	3	3	3	3	3	3
4	1	2	1	1	2	2	3	3
5	1	2	2	2	3	3	1	1
6	1	2	3	3	1	1	2	2
7	1	3	1	2	1	3	2	3
8	1	3	2	3	2	1	3	1
9	1	3	3	1	3	2	1	2
10	2	1	1	3	3	2	2	1
11	2	1	2	1	1	3	3	2
12	2	1	3	2	2	1	1	3
13	2	2	1	2	3	1	3	2
14	2	2	2	3	1	2	1	3
15	2	2	3	1	2	3	2	1
16	2	3	1	3	2	3	1	2
17	2	3	2	1	3	1	2	3
18	2	3	3	2	1	2	3	1

3.6 PLAN D'EXPÉRIENCE L18 CONSIDÉRANT LES FACTEURS ET NIVEAUX À L'ÉTUDE.

Afin de rendre l'expérience plus claire, les facteurs et leurs niveaux respectifs ont été intégrés au plan L18. Le tableau 3-5 indique les 18 expériences et le niveau pour chacun des facteurs.

Tableau 3-5 : Plan d'expérience L18

Expérience	Interdisciplinarité	Structure Modulaire	Type de production	Alimentation	Erreur	Nombre d'employés	Livraison à Temps	Erreur
1	Non intdsc	Aucun	Fixe	Bac	1	-1	0,9	1
2	Non intdsc	Aucun	Équipe	Kanban	2	=	0,95	2
3	Non intdsc	Aucun	Cellules	Ress. + Montage	3	+1	0,99	3
4	Non intdsc	2e Niveau BOM	Fixe	Bac	2	=	0,99	3
5	Non intdsc	2e Niveau BOM	Équipe	Kanban	3	+1	0,9	1
6	Non intdsc	2e Niveau BOM	Cellules	Ress. + Montage	1	-1	0,95	2
7	Non intdsc	1er Niveau BOM	Fixe	Kanban	1	+1	0,95	3
8	Non intdsc	1er Niveau BOM	Équipe	Ress. + Montage	2	-1	0,99	1
9	Non intdsc	1er Niveau BOM	Cellules	Bac	3	=	0,9	2
10	Interdisciplinaire	Aucun	Fixe	Ress. + Montage	3	=	0,95	1
11	Interdisciplinaire	Aucun	Équipe	Bac	1	+1	0,99	2
12	Interdisciplinaire	Aucun	Cellules	Kanban	2	-1	0,9	3
13	Interdisciplinaire	2e Niveau BOM	Fixe	Kanban	3	-1	0,99	2
14	Interdisciplinaire	2e Niveau BOM	Équipe	Ress. + Montage	1	=	0,9	3
15	Interdisciplinaire	2e Niveau BOM	Cellules	Bac	2	+1	0,95	1
16	Interdisciplinaire	1er Niveau BOM	Fixe	Ress. + Montage	2	+1	0,9	2
17	Interdisciplinaire	1er Niveau BOM	Équipe	Bac	3	-1	0,95	3
18	Interdisciplinaire	1er Niveau BOM	Cellules	Kanban	1	=	0,99	1

3.7 MODÈLE DE SIMULATION

Le modèle de simulation a été représenté à la figure 3-3. Il est possible d'y voir le cheminement des commandes dans le procédé. Le modèle a été séparé en sections dans le but de faciliter la compréhension du modèle. Les expériences seront menées à partir de ce modèle de base, avec quelques petites modifications. Les données de simulations seront explicitées dans la prochaine section.

Dans l'ordre, le modèle crée des commandes et des attributs leur sont assignés. Les attributs représentent les options greffées à la machine initiale. Dépendamment de la commande, il peut y avoir entre 0 et 2 options par type. Le tableau 3-6 démontre la fréquence de chaque option qui sera utilisée pour la simulation. Ces données proviennent des ventes de l'année 2013-2014 de l'entreprise étudiée. Il est important de noter que la variabilité et l'incertitude des combinaisons possibles représente, dans le modèle, une turbulence incessante avec laquelle l'entreprise doit continuellement faire affaire.

Tableau 3-6 : Fréquence des options pour chaque commande

Option	Quantité par machine	Fréquence
Option 1	1	0,45
Option 2	1	0,5125
Option 3	1	0,5125
Option 4	1	1
Option 5	1	0,4895
	2	0,4965
	3	0,007
	4	0,007

Après l'assignation des options, la commande est officielle et l'acheteur peut procéder aux achats des composantes. L'achat et le picking sont considérés dans la même opération. Le picking consiste en l'acquisition et la distribution des composantes directement aux postes de travail. Ce délai est directement proportionnel au nombre d'options dans la commande.

Après le picking, la commande est séparée en fonction du type de production étudié. Les têtes sont toujours faites en parallèle dans une cellule spécialisée. La préparation du convoyeur (base de la machine), l'assemblage des options et l'assemblage final seront faits en série ou en parallèle dépendamment du scénario étudié.

La section "Type de production" est séparée en trois. La partie du haut représente le cas où la machine est faite complètement par le même opérateur. Naturellement, les opérations sont faites en série à ce niveau. Il y aura donc autant de machines en cours de production qu'il y aura de monteurs.

La deuxième partie représente, en quelque sorte, une variante de la situation initiale. Une équipe sera composée de 2 monteurs. Puisqu'il y a généralement 4 monteurs, il y aura un total de 2 équipes disponibles. Le modèle saisira l'équipe et la relâchera une fois l'assemblage final terminé. Selon les estimés récoltés sur le terrain, le temps d'assemblage en équipe sera équivalent à 75% du temps de production normal.

La troisième partie représente le cas en cellules de travail. Chaque cellule pourra produire uniquement l'option nécessaire selon le besoin de la commande. Le "dynamisme" des cellules sera physiquement représenté par le regroupement de plusieurs modules au sein d'une même cellule de travail. Ce détail n'est toutefois pas visible au niveau du modèle de simulation puisqu'il s'agit plutôt d'un travail d'équilibrage des lignes. Aussi, puisque la demande varie tant en termes de volume qu'en termes de mix-produit, la présence de cellules dynamiques peut être justifiée. Finalement, la modularité et l'équilibrage naturel viendront, eux-aussi, ajouter au bénéfice des cellules dynamiques.

Une section "NC..." (Non-Conformités) a été ajoutée à la suite de chaque opération. Ceci est dû au fait qu'il arrive régulièrement qu'il y ait une non-conformité au niveau des composantes primaires. Ceci occasionne souvent une perte de temps. Dépendamment du niveau du facteur "alimentation", cette perte de temps sera plus ou moins importante.

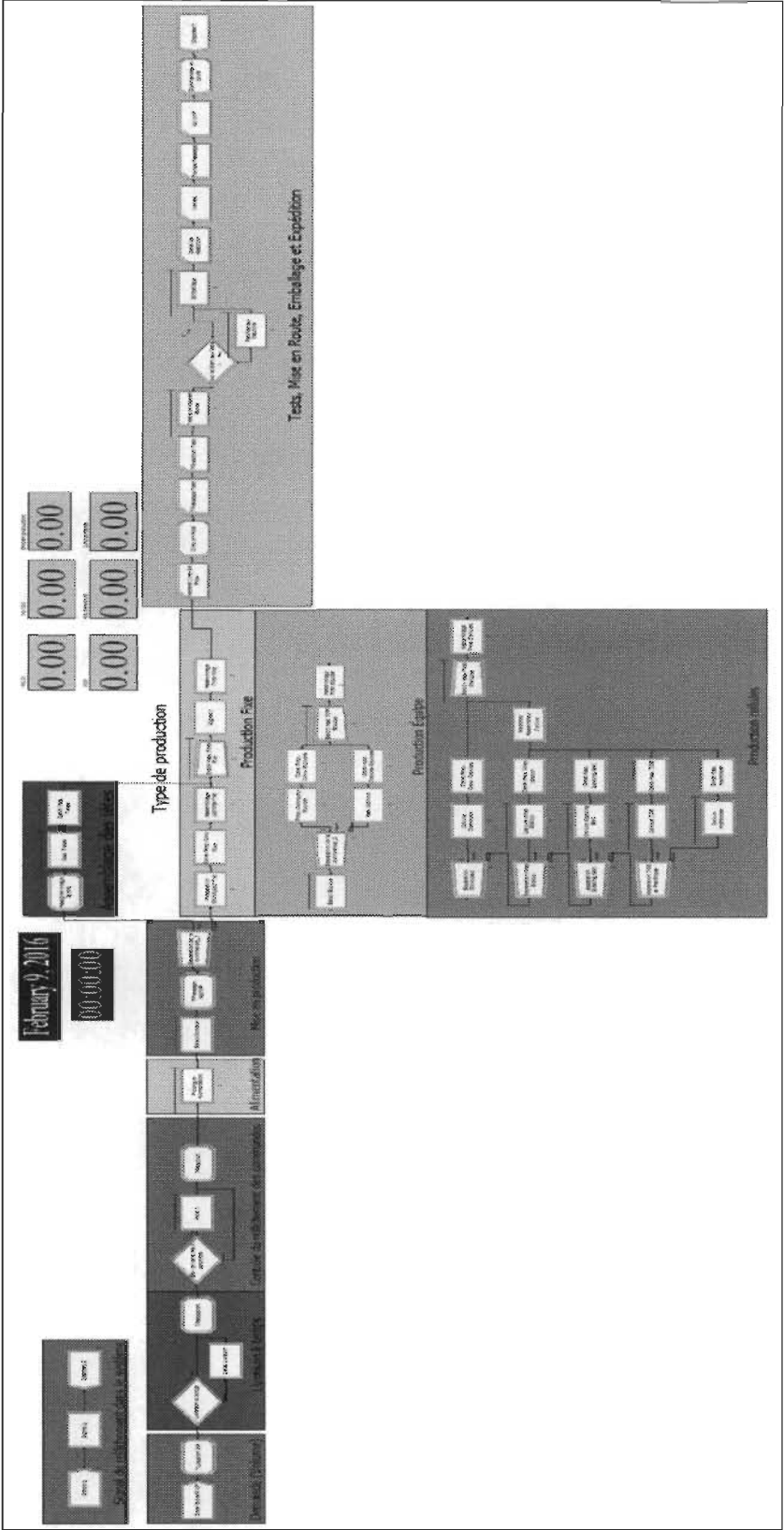


Figure 3-3 : Modèle de simulation

3.8 DONNÉES DE SIMULATION

Les temps d'opération ont été déterminés directement en entreprise avec le directeur de production, les ingénieurs et les opérateurs. Un projet d'implantation avait lieu au moment de la collecte de données. Ces projets concernaient notamment l'aménagement de l'usine, le système de communication, la planification, la gestion des stocks, la qualité et l'ingénierie. Cette période de transition a ainsi servi à justifier l'utilisation d'une fonction exponentielle pour la simulation (Jaber, 2011). Le tableau 3-7 suivant expose les temps d'opération de base (en formules mathématiques d'Arena) qui sont entrés dans le modèle. Il est à noter que, puisque deux employés sont saisis lorsque la production se fait en équipe, le temps d'assemblage final représente 75% du temps d'opération normal. Cette donnée a été déterminée sur place dans l'entreprise.

Tableau 3-7 : Temps d'opérations utilisés pour la simulation

Opération	Temps Opération
Achat et Picking	$(aNbTetes + aNbSB + aNBWS) / 4 * expo(240)$ Minutes
Assemblage Têtes	$aNbTetes * expo(240)$ Minutes
Préparation Convoyeur	$expo(24)$ Heures
Assemblage Options	$aNbPathfinder * expo(270) + aNbSB * expo(90) + aNbWS * expo(180) + aNbTCB * expo(240)$ Minutes
Assemblage final	$EXPO(24)$ Heures
Tests et Mise en Route	$EXPO(16)$ Heures
Reprise Machine	$UNIF(0;24)$ Heures
Emballage	$EXPO(3)$ Heures

Dans le but d'évaluer l'effet de l'utilisation des kanbans au niveau de la qualité des composantes, la fréquence des non-conformités a été évaluée à 20% des composantes. Le temps perdu à chaque non-conformité a été évalué à 1 à 5 minutes.

Aux tests et mise en route, le temps d'opération est évalué à environ 16 heures en moyenne 7 fois sur 10. Les autres machines posent régulièrement problème et nécessitent des temps de mises en route supplémentaires. Ce temps peut varier entre 0 et 24 heures de travail.

Comme l'étude actuelle porte également sur les réseaux, la fiabilité des fournisseurs a dû être prise en compte. Le taux de service habituel des fournisseurs est généralement de 95%. Lorsqu'il y a "n" fournisseurs, le taux de service total peut être évalué par la formule $\text{taux de service total} = 95\%^n$. Le taux de service par fournisseur sera choisi en fonction du niveau du facteur "livraison à temps" et le "n" sera évalué en fonction des structures modulaires qui auront un impact sur le nombre de réceptions de matière par semaine.

Finalement, la production annuelle de l'entreprise a été évaluée à environ 125 machines. Il y a donc un délai entre chaque commande d'environ 2 jours pour un total de 250 jours de travail par année.

3.9 CALCULER LE RÉGIME PERMANENT

Le système s'est démontré stable après environ 1000 heures de réplcation. La période de réchauffement sera donc déterminée à 1000 heures et le temps de simulation sera équivalent à 10 fois cette durée, donc 10 000 heures. Il est possible de voir l'instauration du régime permanent sur la figure 3-4.

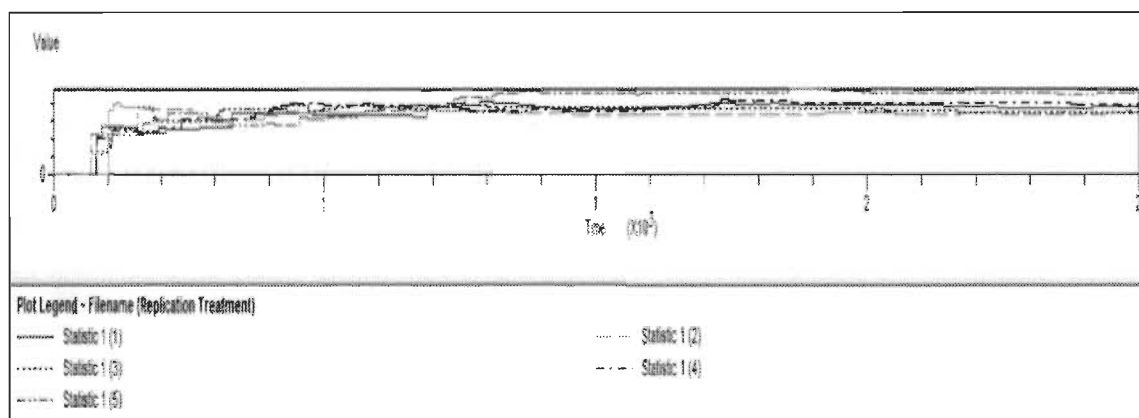


Figure 3-4 : Temps d'instauration du régime permanent dans le modèle de simulation

3.10 EXPÉRIMENTATION PLAN L18

Dans le but de simplifier la compréhension du changement de niveaux des facteurs, le tableau 3-8 de la page suivante a été élaboré. Il est possible d'y voir les paramètres qui sont modifiés à chaque changement de niveau. Ceci permettra de construire le plan d'expérience qui est présenté tout juste à sa suite.

Le tableau 3-9 représente le plan d'expérience qui sera utilisé pour la première simulation. Dans la section de gauche, il est possible d'y voir les facteurs et leurs niveaux respectifs en fonction de chaque expérience. Au centre, il y a le changement de chaque paramètre pour les niveaux de facteurs choisis. À droite, il y a la section pour indiquer les réponses mesurées. Il est à noter que 5 réplifications de chacune de ces expériences ont été effectuées dans le but d'optimiser la valeur des résultats obtenus.

Tableau 3-9 : Plan d'expérience L18

Expérience	Facteurs								Données											Réponses					
	Interdisciplinarité	Structure Modulaire	Type de production	Alimentation	Erreur	Nombre d'employés	Livraison à Temps	Erreur	Temps d'opération	Série/Parallèle	Fréquence NC	T. Perdu pour NC	Création cmd	% Livraison à temps	Richard	Stéphane	Mélissa	José	André	Daniel	Autre	Temps de passage	Temps de réaction	Quantité sortante	Nombre d'encours
1	NIntDsc	Aucun	Fixe	Bac	1	-1	0,9	1	x 1,00	Série	20%	5 min	x 0,5	=0,90^20	= Têtes	= Ass. Final	N/A	= Cellules	= Ass. Final	= Magasinier	N/A				
2	NIntDsc	Aucun	Équipe	Kanban	2	=	0,95	2	x 1,00	// à 2	20%	1 min	x 1,0	=0,95^20	= Têtes	= Ass. Final	= Cellules	= Cellules	= Ass. Final	= Magasinier	N/A				
3	NIntDsc	Aucun	Cellules	Ress. + Montage	3	+1	0,99	3	x 1,00	//	20%	5 min	x 1,5	=0,99^20	= Têtes	= Ass. Final	= Cellules	= Cellules	= Ass. Final	= Ass. Final	= Ass. Final				
4	NIntDsc	2e Niveau BOM	Fixe	Bac	2	=	0,99	3	x 0,75	Série	20%	5 min	x 1,0	=0,99^10	= Têtes	= Ass. Final	= Cellules	= Cellules	= Ass. Final	= Magasinier	N/A				
5	NIntDsc	2e Niveau BOM	Équipe	Kanban	3	+1	0,9	1	x 0,75	// à 2	20%	1 min	x 1,5	=0,90^10	= Têtes	= Ass. Final	= Cellules	= Cellules	= Ass. Final	= Magasinier	=Têtes				
6	NIntDsc	2e Niveau BOM	Cellules	Ress. + Montage	1	-1	0,95	2	x 0,75	//	20%	5 min	x 0,5	=0,95^10	= Têtes	= Ass. Final	N/A	= Cellules	= Ass. Final	= Ass. Final	N/A				
7	NIntDsc	1er Niveau BOM	Fixe	Kanban	1	+1	0,95	3	x 0,50	Série	20%	1 min	x 0,5	=0,95^3	= Têtes	= Ass. Final	= Cellules	= Cellules	= Ass. Final	= Magasinier	= Ass. Final				
8	NIntDsc	1er Niveau BOM	Équipe	Ress. + Montage	2	-1	0,99	1	x 0,50	// à 2	20%	5 min	x 1,0	=0,99^3	= Têtes	= Ass. Final	N/A	= Cellules	= Ass. Final	= Cellules	N/A				
9	NIntDsc	1er Niveau BOM	Cellules	Bac	3	=	0,9	2	x 0,50	//	20%	5 min	x 1,5	=0,90^3	= Têtes	= Ass. Final	= Ass. Final	= Cellules	= Ass. Final	= Magasinier	N/A				
10	IntDsc	Aucun	Fixe	Ress. + Montage	3	=	0,95	1	x 1,00	Série	20%	5 min	x 1,5	=0,95^20	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Monteur	N/A				
11	IntDsc	Aucun	Équipe	Bac	1	+1	0,99	2	x 1,00	// à 2	20%	5 min	x 0,5	=0,99^20	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Magasinier	= Monteur				
12	IntDsc	Aucun	Cellules	Kanban	2	-1	0,9	3	x 1,00	//	20%	1 min	x 1,0	=0,90^20	= Monteur	= Monteur	N/A	= Monteur	= Monteur	= Magasinier	N/A				
13	IntDsc	2e Niveau BOM	Fixe	Kanban	3	-1	0,99	2	x 0,75	Série	20%	1 min	x 1,5	=0,99^10	= Monteur	= Monteur	N/A	= Monteur	= Monteur	= Magasinier	N/A				
14	IntDsc	2e Niveau BOM	Équipe	Ress. + Montage	1	=	0,9	3	x 0,75	// à 2	20%	5 min	x 0,5	=0,90^10	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Monteur	N/A				
15	IntDsc	2e Niveau BOM	Cellules	Bac	2	+1	0,95	1	x 0,75	//	20%	5 min	x 1,0	=0,95^10	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Magasinier	= Monteur				
16	IntDsc	1er Niveau BOM	Fixe	Ress. + Montage	2	+1	0,9	2	x 0,50	Série	20%	5 min	x 1,0	=0,90^3	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Monteur				
17	IntDsc	1er Niveau BOM	Équipe	Bac	3	-1	0,95	3	x 0,50	// à 2	20%	5 min	x 1,5	=0,95^3	= Monteur	= Monteur	N/A	= Monteur	= Monteur	= Magasinier	N/A				
18	IntDsc	1er Niveau BOM	Cellules	Kanban	1	=	0,99	1	x 0,50	//	20%	1 min	x 0,5	=0,99^3	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Monteur	= Magasinier	N/A				

3.11 PLAN D'EXPÉRIENCE COMPLET

À la suite du plan L18, il a été jugé opportun d'effectuer un plan complet avec les facteurs les plus représentatifs. Un des sous-objectifs de cette recherche est d'évaluer les interactions entre les différents facteurs. Pour cette étude, un plan complet a été monté en considérant 5 facteurs à 2 niveaux. Une analyse préliminaire du plan L18 a permis de sélectionner les facteurs interdisciplinarité, structure modulaire, type de production, système d'alimentation et fiabilité des fournisseurs pour le plan complet.

L'équation qui représente le modèle d'expérience pour le plan complet est la suivante :

Équation 3-2 : Modèle mathématique de l'expérience du plan complet

$$\begin{aligned}
 Y_{ijklmn} = & \mu + A_i + B_j + AB_{ij} + C_k + AC_{ik} + BC_{jk} + ABC_{ijk} + D_l + AD_{il} + BD_{jl} \\
 & + ABD_{ijl} + CD_{kl} + ACD_{ikl} + BCD_{jkl} + E_m + AE_{im} + BE_{jm} + ABE_{ijm} \\
 & + CE_{km} + ACE_{ikm} + BCE_{jkm} + DE_{lm} + ADE_{ilm} + BDE_{jlm} + CDE_{klm} \\
 & + \varepsilon_{n(ijklm)}
 \end{aligned}$$

Où

Y_{ijklmn} : La quantité sortante, le nombre d'encours, le délai de réaction ou le temps de passage des produits dans le réseau

μ : La moyenne des réponses mesurées

A_i : Le niveau i de l'interdisciplinarité des employés

B_j : Le niveau j de la conception en structures modulaires

C_k : Le niveau k du système de production utilisé

D_l : Le niveau l du système d'alimentation

E_m : Le niveau m de la probabilité de livraison à temps

AB_{ij} : L'interaction ij de l'interdisciplinarité et de la structure modulaire

AC_{ik} : L'interaction ik de l'interdisciplinarité et du système de production

BC_{jk} : L'interaction jk de la structure modulaire et du système de production

ABC_{ijk} : L'interaction ijk de l'interdisciplinarité, de la structure modulaire et du système de production

AD_{il} : L'interaction il de l'interdisciplinarité et du système d'alimentation

BD_{jl} : L'interaction jl de la structure modulaire et du système d'alimentation

ABD_{ijl} : L'interaction ijl de l'interdisciplinarité, de la structure modulaire et du système d'alimentation

CD_{kl} : L'interaction kl du système de production et du système d'alimentation

ACD_{ikl} : L'interaction ikl de l'interdisciplinarité, du système de production et du système d'alimentation

BCD_{jkl} : L'interaction jkl de la structure modulaire, du système de production et du système d'alimentation

AE_{im} : L'interaction im de l'interdisciplinarité et de la fiabilité des fournisseurs

BE_{jm} : L'interaction jm de la structure modulaire et de la fiabilité des fournisseurs

ABE_{ijm} : L'interaction ijm de l'interdisciplinarité, de la structure modulaire et de la fiabilité des fournisseurs

CE_{km} : L'interaction km du système de production et de la fiabilité des fournisseurs

ACE_{ikm} : L'interaction ikm de l'interdisciplinarité et du système de production et de la fiabilité des fournisseurs

BCE_{jkm} : L'interaction jkm de la structure modulaire, du système de production et de la fiabilité des fournisseurs

DE_{lm} : L'interaction lm du système d'alimentation et de la fiabilité des fournisseurs

ADE_{ilm} : L'interaction ilm de l'interdisciplinarité, du système d'alimentation et de la fiabilité des fournisseurs

BDE_{jlm} : L'interaction jlm de la structure modulaire, du système d'alimentation et de la fiabilité des fournisseurs

CDE_{klm} : L'interaction klm du système de production, du système d'alimentation et de la fiabilité des fournisseurs

$\varepsilon_{n(ijklm)}$: L'erreur expérimentale à chaque combinaison $ijklm$

Chacun des facteurs aura 2 niveaux. Ces niveaux sont décrits au tableau 3-10 suivant.

Tableau 3-10 : Facteurs et niveaux pour le plan complet

Variable	Niveau	
	0	1
Livraison à temps	0,9	0,99
Interdisciplinarité	Non Interdisciplinaire	Interdisciplinaire
Structure modulaire	Aucun	1er niveau BOM
Alimentation	Bac	Kanban
Type de production	Fixe	Cellule

3.12 PLAN D'EXPÉRIENCE DU PLAN COMPLET

Le plan d'expérience comporte 32 expériences différentes avec 5 répliques chacune. Il a été monté aléatoirement à l'aide du logiciel Minitab. Le plan indiquant les 160 expériences et le niveau pour chacun des facteurs est fourni à l'annexe IV.

3.13 EXPÉRIMENTATION PLAN COMPLET

Suivant la même logique que pour le plan L18, chacune des expériences a été conduite à partir du plan d'expérience établi à la section précédente. Les résultats ont été récoltés et notés dans un tableau. Le tableau est également fourni à l'annexe V.

3.14 ÉTAPES DE VALIDATION

Afin de s'assurer de la conformité du modèle et des réponses obtenues, plusieurs étapes ont été suivies. La liste a été élaborée au fur et à mesure de l'avancement de la modélisation afin de s'assurer de sa validité. Ces étapes sont les suivantes.

1. Bien définir et comprendre la problématique et déterminer la portée de l'étude.
2. Récolter les données en entreprise et/ou dans la littérature.
3. Bien décrire le modèle (composantes, variables, relations, etc.) et l'impact des changements de niveau sur les différents paramètres.
4. Dessiner manuellement le modèle et vérifier toutes les actions possibles. S'assurer que toutes les étapes sont couvertes et dans le bon ordre. Vérifier et s'assurer de la chronologie des différentes actions.

5. Conception du réseau par petites étapes successives. Avant de rouler le modèle, s'assurer que toutes les unités de temps sont dans l'unité voulue.
6. Vérification des pourcentages après les *Decide* à l'aide de *Record*.
7. Vérification du nombre de commandes entrant dans le modèle.
8. Vérifier que la file d'attente n'étire pas à l'infini et que le modèle dispose bien des entités.
9. Vérification de l'utilisation des ressources par les modules d'animation.
10. Vérification visuelle des commandes par l'application d'images. Vérification directement dans les files d'attente.
11. Évaluer le temps moyen nécessaire aux opérations d'une journée par rapport aux capacités des ressources. Rouler le modèle sur plusieurs répliques afin d'avoir des données valables. Vérifier la quantité d'entités qui sort du modèle en comparaison au nombre qui est entré dans le modèle.
12. Vérifier le pourcentage d'utilisation des ressources et le comparer au nombre d'entités qui a passé par ces ressources et au temps d'opération par ressource. Vérifier s'il y a cohérence.
13. Vérification du temps de valeur ajoutée moyen réel par rapport à celui théorique.
14. Vérification des valeurs de chaque réponse mesurée par rapport aux données réelles.

CHAPITRE 4

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Quatre réponses ont été choisies parmi celles trouvées dans la littérature pour représenter les mesures de performance du sujet d'étude. Il s'agit des ventes totales, du nombre d'encours, du temps de réaction et du temps de passage. Les ventes sont mesurées à partir des entités sortant du modèle. Le nombre d'encours est représenté en nombre de commandes-client sur le plancher. Le temps de réaction a été déterminé comme le moment entre l'entrée de la commande sur le plancher, incluant l'approvisionnement, jusqu'à l'expédition du produit fini. De l'autre côté, le temps de passage ne considère pas le délai d'approvisionnement de la commande.

4.1 RÉSULTATS ET ANALYSE DU PLAN L18

Aux tableaux 4-1 à 4-4, il est possible d'y voir l'analyse de la variance (ANOVA) calculée respectivement pour la quantité sortante, le nombre d'encours, le délai de réaction et le temps de passage.

Tableau 4-1 : ANOVA pour le plan L18 (Quantité sortante)

Source	DL	SS	MS	F	P
Interdisciplinarité	1	27598	27598	15,95	0,000
Structure modulaire	2	508251	254125	146,9	0,000
Type de production	2	713126	356563	206,12	0,000
Alimentation	2	53848	26924	15,56	0,000
Nombre d'employés	2	292794	146397	84,63	0,000
Livraison à temps	2	65487	32744	18,93	0,000
Erreur	78	134929	1730		
Total	89	1796033			

Tableau 4-2 : ANOVA pour le plan L18 (Nombre d'encours)

Source	DL	SS	MS	F	P
Interdisciplinarité	1	7,9834	7,9834	159,04	0,000
Structure modulaire	2	2,2021	1,1011	21,94	0,000
Type de production	2	47,5808	23,7904	473,95	0,000
Alimentation	2	2,1008	1,0504	20,93	0,000
Nombre d'employés	2	8,6697	4,3349	86,36	0,000
Livraison à temps	2	2,1874	1,0937	21,79	0,000
Erreur	78	3,9153	0,0502		
Total	89	74,6394			

Tableau 4-3 : ANOVA pour le plan L18 (Délai de réaction)

Source	DL	SS	MS	F	P
Interdisciplinarité	1	3,2	3,2	0,34	0,561
Structure modulaire	2	16362,8	8181,4	875,93	0,000
Type de production	2	405,6	202,8	21,71	0,000
Alimentation	2	967,7	483,9	51,8	0,000
Nombre d'employés	2	746,1	373,1	39,94	0,000
Livraison à temps	2	1474,5	737,2	78,93	0,000
Erreur	78	728,5	9,3		
Total	89	20688,3			

Tableau 4-4 : ANOVA pour le plan L18 (Temps de passage)

Source	DL	SS	MS	F	P
Interdisciplinarité	1	81,24	81,24	22,25	0,000
Structure modulaire	2	6859,17	3429,59	939,36	0,000
Type de production	2	622,14	311,07	85,2	0,000
Alimentation	2	100,01	50,01	13,7	0,000
Nombre d'employés	2	221,78	110,89	30,37	0,000
Livraison à temps	2	4,63	2,32	0,63	0,530
Erreur	78	284,78	3,65		
Total	89	8173,76			

Dans ce scénario, le design expérimental a démontré à 95% que la quantité sortante du modèle était maximisée si les employés sont interdisciplinaires, il y a une structure modulaire de premier ou deuxième niveau, le système de production fixe est utilisé, et éventuellement en cellules dynamiques, et le nombre d'employé est égal ou supérieur au nombre actuel. Une fiabilité des fournisseurs élevée agit également positivement sur la capacité totale du plancher puisque les matières premières sont généralement disponibles pour la production.

Au niveau du nombre d'encours, il est possible de voir qu'il est minimisé s'il y a une structure modulaire de 1^{er} niveau, si le plancher travaille en équipe ou, éventuellement, en cellules dynamiques et s'il y a utilisation de kanban ou de bacs. La faible fiabilité des fournisseurs a tendance à empêcher les employés de produire par manque de pièces, expliquant la raison pour laquelle une fiabilité à 90% minimise les encours.

Les résultats démontrent également qu'un employé de moins minimise les encours. Ceci s'explique par le fait que moins il y a d'employé sur le plancher, moins la capacité est grande. En réduisant la capacité, la quantité sortante du modèle est ainsi minimisée, ce qui n'est pas désirable. Le fait de travailler en équipe minimise également le nombre d'encours puisque les employés ne peuvent assembler plus de deux machines en même temps. Cependant, il est également possible de remarquer que cette réduction d'encours a elle-aussi comme contrepartie de minimiser la capacité du plancher.

Selon ces mêmes résultats, le délai de réaction et le temps de passage sont minimisés lorsque le plancher fonctionne avec une structure modulaire de 1^{er} niveau et par kanban. Une production en équipe, et éventuellement la structure modulaire de 2^e niveau et le travail en cellules dynamiques minimise également ces délais. Les résultats démontrent que l'ajout d'un employé à l'assemblage et une fiabilité de fournisseurs de 99% optimisent également le délai de réaction. Le travail d'équipe minimise davantage le temps de passage que les cellules puisque dans le modèle, le temps d'assemblage est considérablement réduit en raison du travail en parallèle des 2 employés sur la même machine. Ceci a été modélisé de la sorte puisque deux employés travaillent en même temps sur une machine. Il a toutefois été démontré dans la réalité que le temps, cette méthode n'est pas toujours possible en raison de tâches qui ne peuvent se chevaucher. Les cellules suivent de près les équipes pour la minimisation du temps de passage et du délai de réaction.

L'interdisciplinarité a également été démontrée comme ayant un effet négatif sur le temps de passage. Ce résultat contrevient aux attentes et peut s'expliquer par le fait qu'un employé avec peu de compétences ne fera qu'une seule tâche alors qu'un interdisciplinaire effectuera plusieurs tâches en parallèle. Il sera plus flexible, mais perdra un peu en efficacité dû à ses déplacements et occasionnelles pertes de temps dues à un déséquilibre des lignes. Toutefois, les moyennes des temps de passage des deux niveaux sont particulièrement rapprochées. Il s'agit ici d'une valeur de 35,7 heures par machine pour des employés interdisciplinaires et 33,8 heures pour les employés dédiés.

Un résumé de ces résultats est présenté au tableau 4-5. Ce dernier indique les niveaux optimaux pour chacune des réponses mesurées. Les résultats de l'analyse de la variance et les tests de Tukey pour chaque scénario se retrouvent à l'annexe III.

Tableau 4-5 : Niveaux optimaux pour les différentes réponses

Réponses mesurées	Niveau optimal					
	Interdisciplinarité	Structure Modulaire	Type de production	Alimentation	Nombre Employés	Livraison à Temps
Quantité sortante	Oui	1er, puis 2e niveau	Fixe, puis Cellules	Ress Montage	=, +1	0,99
Nombre d'encours	Non	1er, puis 2e niveau	Équipe, puis Cellules	Kanban	-1	0,9*
Temps de réaction	Pas significatif	1er, puis 2e niveau	Équipe, puis Cellules	Kanban, Bac	1	0,99
Temps de passage	Non	1er, puis 2e niveau	Équipe, puis Cellules	Kanban	=, +1	Pas significatif

Globalement, dans les conditions étudiées, afin d'optimiser à la fois les ventes, le nombre d'encours, le délai de réaction et le temps de passage, il convient d'avoir des employés multidisciplinaires, la présence d'une structure modulaire au premier ou potentiellement deuxième niveau, une production en cellules dynamiques, un nombre d'employés supérieur à celui actuel et une fiabilité des fournisseurs à 99%.

4.2 RÉSULTATS ET ANALYSE DU PLAN COMPLET

Au tableau 4-6, il est possible d'y voir l'analyse de la variance (ANOVA) récoltée pour le plan complet pour le nombre d'entités sortant du modèle. Aux tableaux 4-7, 4-8 et 4-9, il sera possible d'y voir l'ANOVA respectivement pour le nombre d'encours, le délai de réaction et le temps de passage.

Tableau 4-6 : ANOVA pour le plan complet (Quantité sortante)

Source	DL	SS	MS	F	P
IntDsc	1	108941	108941	201,90	0,000
Smod	1	1474752	1474752	2733,16	0,000
IntDsc * Smod	1	114758	114758	212,68	0,000
Tprod	1	65489	65489	121,37	0,000
IntDsc * Tprod	1	15386	15386	28,51	0,000
Smod * Tprod	1	54428	54428	100,87	0,000
IntDsc + Smod + Tprod	1	13969	13969	25,89	0,000
Alim	1	4295	4295	7,96	0,006
IntDsc * Alim	1	779	779	1,44	0,232
Smod * Alim	1	289	289	0,54	0,466
IntDsc * Smod * Alim	1	1544	1544	2,86	0,093
Tprod * Alim	1	439	439	0,81	0,369
IntDsc * Tprod * Alim	1	273	273	0,51	0,478
Smod * Tprod * Alim	1	39	39	0,07	0,788
LivTps	1	1697	1697	3,14	0,078
IntDsc * LivTps	1	685	685	1,27	0,262
Smod * LivTps	1	1829	1829	3,39	0,068
IntDsc * Smod * LivTps	1	278	278	0,52	0,474
Tprod * LivTps	1	66	66	0,12	0,726
IntDsc * Tprod * LivTps	1	131	131	0,24	0,622
Smod * Tprod * LivTps	1	146	146	0,27	0,603
Alim * LivTps	1	522	522	0,97	0,327
IntDsc * Alim * LivTps	1	581	581	1,08	0,301
Smod * Alim * LivTps	1	104	104	0,19	0,661
Tprod * Alim * LivTps	1	1482	1482	2,75	0,100
Erreur	134	72303	540		
Total	159	1935206			

Tableau 4-7 : ANOVA pour le plan complet (Nombre d'encours)

Source	DL	SS	MS	F	P
IntDsc	1	11,7874	11,7874	1380,01	0,000
Smod	1	11,1835	11,1835	1309,31	0,000
IntDsc * Smod	1	2,4109	2,4109	282,25	0,000
Tprod	1	21,0443	21,0443	2463,76	0,000
IntDsc * Tprod	1	0,3978	0,3978	46,57	0,000
Smod * Tprod	1	0,2434	0,2434	28,50	0,000
IntDsc + Smod + Tprod	1	0,3759	0,3759	44,01	0,000
Alim	1	0,0052	0,0052	0,61	0,435
IntDsc * Alim	1	0,0164	0,0164	1,92	0,168
Smod * Alim	1	0,0279	0,0279	3,26	0,073
IntDsc * Smod * Alim	1	0,0011	0,0011	0,13	0,718
Tprod * Alim	1	0,0169	0,0169	1,98	0,161
IntDsc * Tprod * Alim	1	0,0011	0,0011	0,13	0,718
Smod * Tprod * Alim	1	0,0001	0,0001	0,01	0,909
LivTps	1	0,0021	0,0021	0,25	0,621
IntDsc * LivTps	1	0,0196	0,0196	2,30	0,132
Smod * LivTps	1	0,0046	0,0046	0,53	0,466
IntDsc * Smod * LivTps	1	0,0140	0,0140	1,64	0,202
Tprod * LivTps	1	0,0031	0,0031	0,36	0,550
IntDsc * Tprod * LivTps	1	0,0014	0,0014	0,16	0,691
Smod * Tprod * LivTps	1	0,0022	0,0022	0,26	0,614
Alim * LivTps	1	0,0090	0,0090	1,05	0,307
IntDsc * Alim * LivTps	1	0,0059	0,0059	0,69	0,406
Smod * Alim * LivTps	1	0,0048	0,0048	0,56	0,456
Tprod * Alim * LivTps	1	0,0000	0,0000	0,00	0,972
Erreur	134	1,1446	0,0085		
Total	159	48,7231			

Tableau 4-8 : ANOVA pour le plan complet (Temps de réaction)

Source	DL	SS	MS	F	P
IntDsc	1	4,4	4,4	5,88	0,017
Smod	1	46680,7	46680,7	63022,90	0,000
IntDsc * Smod	1	2,8	2,8	3,75	0,055
Tprod	1	972,5	972,5	1312,90	0,000
IntDsc * Tprod	1	8,3	8,3	11,14	0,001
Smod * Tprod	1	69,3	69,3	93,53	0,000
IntDsc + Smod + Tprod	1	0,0	0,0	0,01	0,914
Alim	1	4,9	4,9	6,57	0,011
IntDsc * Alim	1	0,2	0,2	0,21	0,650
Smod * Alim	1	4,8	4,8	6,51	0,012
IntDsc * Smod * Alim	1	0,2	0,2	0,33	0,565
Tprod * Alim	1	2,9	2,9	3,92	0,050
IntDsc * Tprod * Alim	1	2,6	2,6	3,50	0,064
Smod * Tprod * Alim	1	4,7	4,7	6,36	0,013
LivTps	1	5152,6	5152,6	6956,48	0,000
IntDsc * LivTps	1	0,0	0,0	0,02	0,883
Smod * LivTps	1	1204,9	1204,9	1626,74	0,000
IntDsc * Smod * LivTps	1	0,7	0,7	0,98	0,323
Tprod * LivTps	1	0,7	0,7	1,01	0,318
IntDsc * Tprod * LivTps	1	0,0	0,0	0,02	0,876
Smod * Tprod * LivTps	1	1,8	1,8	2,45	0,120
Alim * LivTps	1	0,0	0,0	0,00	0,945
IntDsc * Alim * LivTps	1	0,4	0,4	0,48	0,491
Smod * Alim * LivTps	1	0,3	0,3	0,38	0,538
Tprod * Alim * LivTps	1	0,1	0,1	0,09	0,763
Erreur	134	99,3	0,7		
Total	159	54219,0			

Tableau 4-9 : ANOVA pour le plan complet (Temps de passage)

Source	DL	SS	MS	F	P
IntDsc	1	3,3	3,3	5,39	0,022
Smod	1	25101,8	25101,8	40606,97	0,000
IntDsc * Smod	1	3,7	3,7	5,95	0,016
Tprod	1	743,5	743,5	1202,72	0,000
IntDsc * Tprod	1	7,6	7,6	12,31	0,001
Smod * Tprod	1	72,1	72,1	116,65	0,000
IntDsc + Smod + Tprod	1	0,0	0,0	0,00	0,989
Alim	1	6,0	6,0	9,63	0,002
IntDsc * Alim	1	0,1	0,1	0,11	0,744
Smod * Alim	1	4,6	4,6	7,41	0,007
IntDsc * Smod * Alim	1	0,5	0,5	0,82	0,366
Tprod * Alim	1	2,1	2,1	3,41	0,067
IntDsc * Tprod * Alim	1	2,1	2,1	3,47	0,065
Smod * Tprod * Alim	1	5,2	5,2	8,35	0,004
LivTps	1	0,3	0,3	0,56	0,454
IntDsc * LivTps	1	0,0	0,0	0,01	0,913
Smod * LivTps	1	0,0	0,0	0,00	0,953
IntDsc * Smod * LivTps	1	0,4	0,4	0,70	0,403
Tprod * LivTps	1	0,3	0,3	0,51	0,478
IntDsc * Tprod * LivTps	1	0,2	0,2	0,26	0,612
Smod * Tprod * LivTps	1	0,8	0,8	1,30	0,257
Alim * LivTps	1	0,1	0,1	0,13	0,723
IntDsc * Alim * LivTps	1	0,1	0,1	0,18	0,674
Smod * Alim * LivTps	1	0,4	0,4	0,64	0,426
Tprod * Alim * LivTps	1	0,0	0,0	0,07	0,790
Erreur	134	82,8	0,6		
Total	159	26038,1			

Après l'analyse du plan complet, les résultats ont démontré avec un degré de confiance de 95% que la structure modulaire était essentielle pour maximiser la quantité de produits sortants et annulait l'effet positif de la production fixe par rapport à la production en cellules. Le système kanban et l'interdisciplinarité ont également amené à des résultats optimaux pour cette même réponse. L'effet des structures modulaires s'explique par la réduction du temps d'opération et du temps de gestion des pièces. Les kanbans amènent

quant à eux la réduction des pertes de temps en production dues aux non-conformités des pièces brutes et à l'alimentation des postes. L'interdisciplinarité permet de son côté d'utiliser de façon optimale la capacité disponible des ressources humaines. Dans ces circonstances, les autres facteurs deviennent non-significatifs.

L'analyse a également démontré que le système d'alimentation et la fiabilité des fournisseurs n'avaient pas d'impact significatif sur le nombre d'encours. De son côté, l'interaction de l'utilisation des cellules dynamiques et de la structure modulaire minimise le nombre d'encours sur le plancher. Les résultats ont également démontré que l'interdisciplinarité augmentait le nombre d'encours. Ceci est probablement dû au fait que les employés multidisciplinaires peuvent choisir de travailler sur plusieurs commandes différentes et que le logiciel de simulation n'offre que peu de choix au niveau des règles d'ordonnancement et de l'équilibrage des lignes. Un meilleur équilibrage en situation réelle pourrait fournir des résultats différents. Il faut toutefois noter qu'en présence d'une structure modulaire, la différence entre la présence et l'absence de l'interdisciplinarité est presque nulle (3,2 commandes contre 3,5 commandes à la fois sur le plancher).

L'analyse du temps de réaction a permis de conclure que l'interaction de l'utilisation des cellules dynamiques et de la structure modulaire permettait de réduire le délai de réponse. Dans ces circonstances, l'interdisciplinarité et le système d'alimentation deviennent peu significatifs. La fiabilité élevée des fournisseurs a également été démontrée comme ayant un effet positif significatif au niveau du délai de réaction et ce, davantage en présence d'une structure modulaire.

Au niveau du temps de passage, il a été démontré que la présence d'une structure modulaire utilisée conjointement avec les cellules dynamiques permettra d'optimiser le temps de passage des produits sur le plancher. En présence de cette interaction, les autres facteurs deviennent non-significatifs.

Enfin, en fusionnant chacune des combinaisons optimales obtenues lors de cette analyse, il est possible d'établir une combinaison qui saura optimiser chacune des réponses

d'intérêt. Hasardement, il s'est avéré que toutes les réponses étaient en concordance et qu'il n'eût été nécessaire d'établir une matrice de décision pour établir la meilleure décision possible. Ainsi, la combinaison permettant d'optimiser chaque réponse est :

- La présence d'une équipe interdisciplinaire
- L'utilisation d'une structure modulaire
- Un système de production en cellules dynamiques
- L'alimentation des postes à l'aide d'un système kanban
- Une fiabilité de fournisseurs de 99%

Un résumé de ces résultats est présenté au tableau 4-10. Ce dernier indique les combinaisons optimales pour chacune des réponses mesurées. Les résultats de l'analyse de la variance et les tests de Tukey pour chaque scénario se retrouvent à l'annexe VI.

Tableau 4-10 : Combinaisons optimales pour les différentes réponses plan complet

Réponse mesurée	Combinaison idéale				
	Interdisciplinarité	Structure Modulaire	Type de production	Alimentation	Livraison à temps
Quantité sortante	Disciplinaire	1er niveau	Pas significatif**	Kanban	Pas significatif
Nombre d'encours	Non disciplinaire*	1er niveau	Cellules	Pas significatif**	Pas significatif
Temps de réaction	Pas significatif**	1er niveau	Cellules	Pas significatif**	0,99
Temps de passage	Pas significatif**	1er niveau	Cellules	Pas significatif**	Pas significatif
Niveau idéal	Disciplinaire	1er niveau	Cellules	Kanban	0,99

* Effet peu significatif

** Grâce aux interactions

En comparant les résultats obtenus dans cette section à ceux du plan L18, on remarque que dans l'ensemble, les réponses concordent. Les seules différences sont le passage d'un effet significatif à un « non-significatif grâce aux interactions ». Il est donc possible de constater que l'interaction de différents facteurs peut atténuer l'effet d'autres facteurs qui était cru significatif aux premiers abords. Elles peuvent également, dans d'autres cas,

favoriser davantage leur effet. Il est question ici principalement de l'interaction cellules dynamiques – structure modulaire qui a tendance à optimiser les résultats. Enfin, l'analyse du plan L18 permet d'ajouter que la présence d'un employé supplémentaire permettra d'optimiser les ventes, le nombre d'encours, le délai de réaction ainsi que le temps de passage.

4.3 VALIDATION

Afin de vérifier la validité des résultats, il convient de faire une comparaison avec l'état initial de l'entreprise. Pour ce faire, le même modèle de simulation que celui du plan complet a été utilisé avec les facteurs et niveaux correspondants. Le tableau 4-11 présente les niveaux pour chaque facteur qui ont été utilisés pour l'expérience de validation. Les résultats pour ces expériences sont présentés à l'annexe VII.

Tableau 4-11 : Facteurs et niveaux pour expériences de validation

Expérience	Interdisciplinarité	Structure Modulaire	Type de Production	Alimentation	Livraison à temps
Initial	Non Interdisciplinaire	Aucun	Fixe	Bac	99
Proposé	Interdisciplinaire	1er niveau	Cellules	Kanban	99

L'analyse de la variance pour chaque indicateur de performance mesuré est fournie aux tableaux 4-12 à 4-15.

Tableau 4-12 : ANOVA de validation pour la quantité sortante

Source	DL	SS	MS	F	P
Expérience	1	161820	161820	440,01	0,000
Erreur	18	6620	368	40606,97	
Total	19	168440			

Tableau 4-13 : ANOVA de validation pour le nombre d'encours

Source	DL	SS	MS	F	P
Expérience	1	3,3972	3,3972	3157,4	0,000
Erreur	18	0,0194	0,0011		
Total	19	3,4166			

Tableau 4-14 : ANOVA de validation pour le temps de passage

Source	DL	SS	MS	F	P
Expérience	1	4390	4390	6182,72	0,000
Erreur	18	12,8	0,7		
Total	19	4401,8			

Tableau 4-15 : ANOVA de validation pour le temps de réaction

Source	DL	SS	MS	F	P
Expérience	1	5758,7	5758,7	8142,79	0,000
Erreur	18	12,7	0,7		
Total	19	5771,4			

À la lumière de ces résultats, il est possible de conclure que la combinaison suggérée dans cette étude permet d'améliorer significativement chacune des réponses mesurées. Comparativement à la situation initiale, la quantité sortante du modèle proposé est passée de 701 à 881 commandes (gain de 25,7%); le nombre d'encours moyen est passé de 4 à 3,2 commandes (réduction de 20,6%); le temps de passage est passé de 51,4 heures à 21,8 heures (réduction de 57,7%); et le temps de réaction est passé de 59,0 heures à 25,0 heures (réduction de 57,6%). L'analyse complète incluant le test de Tukey est fournie à l'annexe VIII.

4.4 ATTEINTE DU RÉGIME PERMANENT

La simulation a été montée dans le but de représenter une entreprise désirant adopter l'amélioration continue par l'utilisation des cellules dynamiques et de ses facteurs de succès. La section précédente a prouvé que les cellules dynamiques ont un effet positif sur

la performance d'un réseau. Il convient toutefois de vérifier l'impact des facteurs étudiés dans ce travail dans un système qui a atteint le régime permanent. Une simulation de validation avec des temps suivant une distribution normale et avec un coefficient de variation de 3 sera effectuée dans cette section. Le coefficient de variation a été évalué à 3 dans le but de contenir 99,73% des variations des temps d'opérations à l'intérieur de 3 écart-types de la moyenne. Les résultats de la simulation sont fournis à l'annexe IX.

Dix répliques ont été exécutées à cette étape. Les niveaux ont été fixés selon une usine possédant des employés interdisciplinaires, une structure modulaire de premier niveau, une production en cellules dynamiques, une alimentation en kanban et une fiabilité de fournisseurs à 99%. Une analyse de la variance qui compare l'usine en transition à celle ayant atteint le régime permanent est présentée aux tableaux 4-16 à 4-19. Il est possible d'y voir l'ANOVA pour chacune des 4 réponses mesurées dans ce travail.

Tableau 4-16 : ANOVA de la comparaison en régime permanent pour la quantité sortante

Source	DL	SS	MS	F	P
Expérience	1	161820	161820	440,01	0,000
Erreur	18	6620	368		
Total	19	168440			

Tableau 4-17 : ANOVA de la comparaison en régime permanent pour le nombre d'encours

Source	DL	SS	MS	F	P
Expérience	1	3,3972	3,3972	3157,4	0,000
Erreur	18	0,0194	0,0011		
Total	19	3,4166			

Tableau 4-18 : ANOVA de la comparaison en régime permanent pour le temps de passage

Source	DL	SS	MS	F	P
Expérience	1	4390	4390	6182,72	0,000
Erreur	18	12,8	0,7		
Total	19	4401,8			

Tableau 4-19 : ANOVA de la comparaison en régime permanent pour le temps de réaction

Source	DL	SS	MS	F	P
Expérience	1	5758,7	5758,7	8142,79	0,000
Erreur	18	12,7	0,7		
Total	19	5771,4			

Après analyse, il est possible d'affirmer à 95% que l'atteinte du régime permanent aura un effet bénéfique sur l'ensemble de la production. Les résultats démontrent que la moyenne de la quantité sortante est passée de 195,8 commandes par année à 200,1 (gain de 2,2%); celle des encours est passée de 3,2 commandes à 2,98 (diminution de 6,2%); celle du temps de passage est passée de 21,8 heures par commande à 20,1 (diminution de 7,0%); et celle du temps de réaction est passée de 25,0 heures à 23,3 (diminution de 7,6%).

4.5 DISCUSSION

L'intérêt des cellules dynamiques repose sur la variabilité subie par les entreprises tant en termes de volume qu'au niveau du mix-produit. Dans le cas actuel, les expériences ont montré que les cellules dynamiques sont particulièrement intéressantes afin d'améliorer l'efficacité et la flexibilité du réseau. Les plus gros avantages des cellules dynamiques se font surtout sentir au niveau du temps de passage, du délai de réaction et du nombre de commandes en cours dans le système. Il est possible d'expliquer ce phénomène par le chevauchement des opérations et l'ordonnancement qui est fait en fonction du temps d'entrée de la commande dans le système. Ces deux outils de planification ont pour conséquences de réduire considérablement le temps qu'une commande passe dans le système, en comparaison à un système de production fixe qui doit absolument effectuer toutes les tâches en série.

Dans le cas d'étude actuel, la variabilité du mix-produit est représentée par la présence d'une structure modulaire. Dans le cas où une entreprise ne fonctionne qu'en commandes personnalisées et qu'aucune standardisation n'est possible, il n'y aurait aucune conception

modulaire possible. Du coup, l'absence d'une structure modulaire peut être considérée comme une variabilité très grande. Une structure modulaire de deuxième niveau de la nomenclature indique qu'il commence à y avoir une certaine standardisation au niveau de certaines composantes. La structure au premier niveau indique que les produits ont été standardisés jusqu'aux sous-assemblages et que, dans ce contexte, il y a peu de variabilité. Il faut toutefois mentionner qu'une structure modulaire implique nécessairement une variabilité puisqu'en son absence, une production continue serait préférée. En se basant sur les résultats obtenus en simulation, une production en cellules dynamiques sera intéressante s'il y a un minimum de standardisation, qu'elle soit au deuxième ou au premier niveau de la nomenclature.

D'un autre côté, pour considérer l'usage des cellules dynamiques, il est nécessaire qu'il y ait une variabilité dans le volume de demande. Cette variété s'est d'ailleurs fait sentir au niveau de la combinaison de chaque produit entrant dans le système. Suivant les probabilités d'apparition de chaque option pour chaque commande, il a été possible de modéliser un environnement turbulent où le volume de demande à chaque poste de travail varie continuellement. Ces variations ont permis de justifier l'utilisation des cellules dynamiques et a également eu pour effet d'en démontrer l'intérêt. Enfin, afin de profiter pleinement des bénéfices des cellules dynamiques, il sera intéressant de les intégrer à un réseau *lean* offrant plusieurs conditions de réussites telles que la présence d'une structure modulaire, une équipe multidisciplinaire ainsi que les autres facteurs étudiés dans ce travail.

CHAPITRE 5

PROJET MITACS

Grâce à Mitacs, l'Université du Québec à Trois-Rivières et une entreprise québécoise spécialisée en assemblage électromécanique, il a été possible d'exécuter un stage d'un an directement en entreprise.

Plusieurs données ont pu être récoltées lors des 6 premiers mois. Elles ont notamment servies à modéliser un cas réel et alimenter la simulation à événements discrets faite sur le logiciel Rockwell Arena.

L'expérience terrain a également permis de mettre le doigt sur plusieurs problématiques faisant surface lors d'une implantation d'aménagement en cellules dynamiques en milieu réel. Certains de ces facteurs ont été nommés dans la littérature. Il s'agit, entre autres de l'appui de la direction, l'accord et compréhension du personnel, la formation et implication des employés, la revue de la planification (avec ERP, équilibrage et ordonnancement), la gestion des stocks adéquate (système kanban, gestion min/max, ERP), l'intégration de l'ingénierie (conception modulaire, standardisation), l'intégration des données via logiciel ERP, etc.

Le cas étudié lors du stage permet de valider concrètement certaines clés de succès théoriques et étudier leurs effets réels et leurs interrelations. Aussi, afin d'assurer la pérennité du projet d'aménagement, il a convenu d'implanter ces facteurs de succès et valider leur effet de « succès ». L'implantation réelle des DCMS a permis de voir la cohésion entre tous les départements et services d'une entreprise. Elle démontre clairement qu'une entreprise est un tout et non la somme de plusieurs ensembles. L'étude de ce cas a ainsi pu servir de validation de plusieurs théories abordées dans la littérature, mais dans un contexte de réseau utilisant la production en cellules dynamiques.

5.1 MÉTHODOLOGIE SUR LE TERRAIN

La méthode DMAIC a été celle principalement utilisée. La résistance au changement, bien que présente, n'était pas majeure. Une technique d'écoute et humaine a permis d'expliquer les changements, les faire accepter et avancer dans le temps.

L'implantation des cellules dynamiques était l'étape initiale, nécessaire à la suite des choses. Avec un nouvel aménagement en place, les problèmes autrefois ignorés ont refait surface. Des lacunes au niveau de la planification, la qualité, la gestion des stocks, la fiabilité des fournisseurs, la formation du personnel, l'intégration de l'ingénierie, la standardisation des composantes, les méthodes de travail, la résolution de problèmes, le leadership, le cahier des charges, la capacité de production, etc. ont été constatées.

Tous ces problèmes représentaient un projet en soit. Il a donc fallu intégrer de nouveaux changements afin de que l'aménagement soit optimal. Ces changements ont été notés comme un requis pour le bon fonctionnement de l'entreprise réseau, c'est pourquoi il était important de se pencher sur le sujet.

Pour chaque projet, une équipe a été montée et était responsable de définir clairement le problème, le mesurer, l'analyser, trouver des solutions, les implanter et assurer le suivi.

Afin de bien faire le lien entre la recherche et l'implantation pratique, il convient de mettre en relief les différents objectifs de la recherche et les appliquer concrètement à la réalité vécue dans l'entreprise.

5.1.1 Objectifs :

Déterminer un indicateur de performance des réseaux qui sera représentatif de la réalité.

Pour contrôler la performance d'un système, il est nécessaire de le mesurer. La mesure des indicateurs de performance varie d'un système à l'autre, qu'il s'agisse d'entreprise, de réseau, d'organisme ou d'individu.

Dans l'entreprise, différentes mesures de performance étaient initialement employées. Il s'agit notamment du temps de passage, du temps de réaction (temps de réponse au client) et du ratio ventes/ressources.

D'autres mesures de performance pouvaient être utilisées pour inclure le réseau dans l'équation. Il s'agit du retard accumulé, du pourcentage de non-conformités et leur cause, du nombre de pièces livrées en retard, du taux d'efficacité des employés, etc. Des données pour ces 7 critères ont été accumulées. Des feuilles, tableaux et graphiques ont été développés pour permettre de bien les saisir. Des exemples sont fournis aux figures 5-1 suivantes.

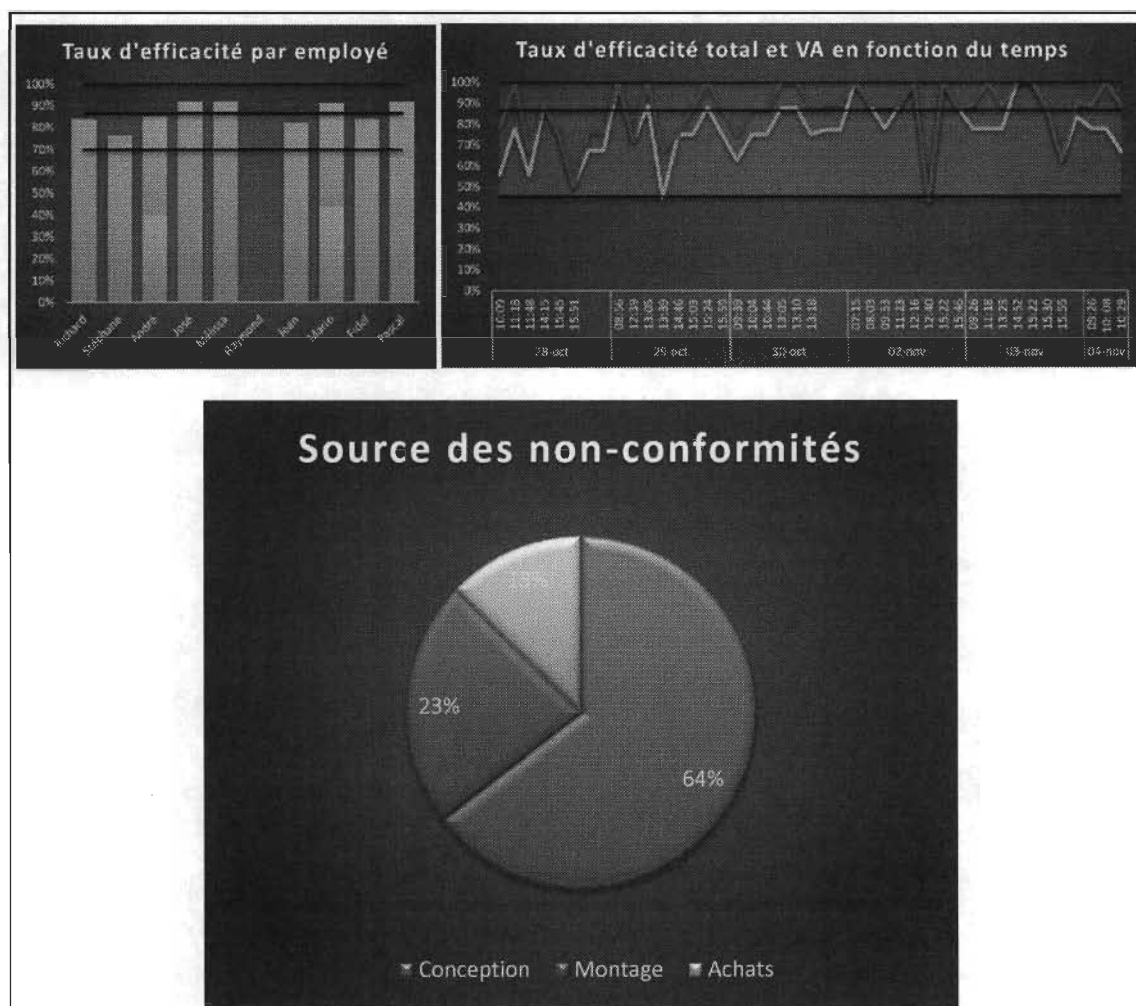


Figure 5-1 : Exemples de mesures de performance

Étudier l'efficacité et la pertinence des cellules dynamiques sur la performance des PME en réseau :

Considérant l'objectif actuel, il était nécessaire de mesurer des critères de performance afin de constater l'état actuel des choses. Dans l'entreprise, plusieurs de ces critères étaient déjà présents dans les banques de données. Ils ont pu servir de base comparative.

Une analyse du système par une étude de la cartographie de la chaîne de valeur a permis de proposer l'idée du fonctionnement en cellules dynamiques. Le stage avec Mitacs a suivi cette discussion.

À la suite de l'implantation de l'aménagement, il convenait d'assurer le contrôle du nouveau système. À l'utilisation de l'aménagement, certaines lacunes internes ont pu être notées car elles nuisaient au bon déroulement des activités. Il s'agit de la planification, la qualité, la gestion des stocks, la fiabilité des fournisseurs, la formation du personnel, l'intégration de l'ingénierie, la standardisation des composantes, les méthodes de travail, la résolution de problèmes, le leadership, le cahier des charges et du manque de connaissance dans la capacité réelle de production.

Chacune de ces lacunes représentait un projet en soit. L'approche DMAIC a été de nouveau utilisée à chacun d'eux.

Pour répondre à l'objectif étudié ici, l'effet des cellules dynamiques s'est avéré positif sur l'ensemble du système, mais l'implantation des outils *lean*, interdépendants les uns des autres, est devenue essentielle pour assurer la survie et le bon fonctionnement du nouveau système.

Déterminer les conditions de réussite pour l'utilisation des cellules dynamiques dans le contexte réseau.

Afin de déterminer les conditions de réussite des cellules dynamiques, deux approches ont été utilisées. Il s'agit de l'approche théorique où une revue de littérature a été faite et où les conditions théoriques qui assureraient la réussite d'un tel projet ont été répertoriées. Dans un autre temps, le projet Mitacs en entreprise a permis de constater et valider les conditions de réussite réellement vécues dans le contexte manufacturier québécois.

La méthodologie employée pour répondre à cet objectif consistait à implanter concrètement les projets d'amélioration. Chacun d'entre eux faisait ressortir des nouveaux défis et des nouvelles priorités. L'implication des employés et un bon système de communication par une écoute active des idées des employés ont permis d'avoir l'heure juste sur la production quotidienne.

Chaque jour, des nouveaux défis étaient rencontrés :

- Planification
 - L'équilibrage des lignes n'est pas optimal
 - Le manque de planification oblige à sauter d'une commande à l'autre et étirer le temps de passage des commandes sur le plancher
 - Il n'y a pas de synchronisation avec le poste goulot
 - Les employés au goulot sont surchargés et il arrive que ce poste arrête de produire
 - Les temps de production réels ne sont pas connus, ce qui rend la planification difficile
 - Le système ERP n'arrive pas à effectuer efficacement la planification et l'ordonnancement de la production
 - Les commandes sont lancées en production avant de recevoir tout le matériel pour produire et assurer un produit fini totalement conforme

- Système qualité
 - Il n'y a aucun système d'assurance ou de contrôle de la qualité
 - Il n'y a pas de contrôle qualité à la réception
 - Il n'y a aucune responsabilisation des employés à la production et entre les départements
 - Les employés ont peu de temps réservé aux projets d'amélioration. Ils sont généralement surchargés par les tâches quotidiennes
- Disponibilité du matériel et des outils
 - Il manque souvent des pièces pour la production
 - Il y a des non-conformités dans les pièces à assembler
 - Les employés perdent souvent du temps à rechercher matériel et outils pour travailler
 - Le cannibalisme entre les commandes est fréquent et n'est pas documenté ni suivi rigoureusement
- Méthodes de travail
 - La consommation du matériel n'est pas suffisamment simple
 - Il y a un manque de formation de certains employés
 - Il y a des problèmes de lecture de dessins
 - Chaque employé ne connaît pas précisément les tâches qu'il doit exécuter et les priorités
 - Il n'y a pas de formation multiple
 - L'absence de cartes graphiques dans les ordinateurs sur le plancher rend la lecture des dessins lourde et inefficace occasionnant de longues pertes de temps
- Environnement de travail
 - Les espaces de travail sont peu ordonnés causant une recherche de matériel, outils et espace pour assembler
- Conception et cahier des charges
 - Les besoins des clients sont souvent mal interprétés

- L'entreprise fabrique continuellement des produits personnalisés quand il pourrait être possible de standardiser certaines composantes
- Il y a souvent des erreurs dans les dessins et les nomenclatures
- Le cahier des charges n'est pas toujours bien défini, ce qui rend difficile la compréhension des besoins des clients et ne ferme pas la porte à tout changement de dernière minute
- Il y a peu de structure au niveau des procédures de conception. Les nomenclatures ne sont pas hiérarchisées et structurées. Il n'y a pas de processus standards lors d'une création de produit.
- Gestion d'équipe, leadership et communication
 - Il n'y a pas toujours de rétroaction quant à la bonne compréhension de certains messages considérant notamment la production et les changements apportés dans les méthodes de travail
 - Il n'y a généralement aucun suivi qui est fait suivant la demande de projets d'amélioration
 - Il n'y a aucun indicateur de performance ou objectifs communs et personnels à atteindre
 - Le système de communication est peu efficient. Personne ne sait ce qui se passe, les commandes à venir, les changements futurs. Il n'y a pas de transmission d'information post-rencontre.
 - Les ventes, l'ingénierie, les achats et la production ne vont pas dans la même direction en raison d'objectifs trop différents
 - Certains employés refusent d'obtempérer face au changement
 - Il y a peu d'autonomie et de leadership chez certains employés clés.
 - Le partage d'information et de connaissances est limité.
 - Il y a une vue myope dans le processus et une déresponsabilisation des départements

- Système ERP
 - Le système ERP a été monté sur une base totalement personnalisée et rend les modifications du système difficiles, parfois impossibles.
 - Plusieurs éléments de la base de données ont été négligés lors de l'implantation, ce qui cause maintenant des pertes de temps importantes et nécessite de refaire toute la BD
 - Le système ERP ne gère pas les kanban

Globalement, tous ces constats représentaient les conditions de réussite d'implantation d'un aménagement en cellules dynamiques et ont dû être répondus afin de pouvoir constater de manière réelle l'effet des cellules dynamiques sur l'efficacité et la flexibilité des entreprises réseaux.

Valider les résultats de la recherche théorique par l'application sur un cas pratique.

L'application du cas pratique a servi à valider ce qui a été noté dans la revue de littérature.

Concrètement, pour appliquer chaque projet :

- Une équipe a été montée à partir d'employés touchés par le problème et parfois même des employés qui n'avaient à première vue rien à voir dans le projet. Un point de vue objectif doit toujours être le bienvenu.
- Une première rencontre était faite pour définir le problème et expliquer à tout le monde leur rôle dans le projet. Les rôles consistaient souvent à bien observer la problématique et ses impacts dans la réalité quotidienne.
- Une seconde rencontre avait ensuite lieu pour discuter de ce qui a été noté au cours des derniers jours. Ce qui devait être mesuré comme indicateur de performance était déterminé.
- Une semaine s'écoulait où chaque membre de l'équipe prenait des mesures.

- Une rencontre suivait pour analyser et discuter des résultats obtenus et des idées d'amélioration étaient cherchées en équipe. Lorsqu'une ou des idées étaient acceptées, elles étaient implantées dans les jours qui suivaient.
- Des rencontres hebdomadaires permettaient ensuite de récolter les idées et suggestions concernant les nouvelles méthodes de travail. Un contrôle avait lieu ensuite à chaque semaine pendant 1 mois et ensuite après 2 mois jusqu'à ce que tout le monde ait bien saisi les changements.
- Une fois le projet clôt, l'équipe se déformait et une nouvelle équipe était formée pour travailler sur un nouveau projet.

Le but de cette méthode était surtout d'implanter une méthodologie à l'interne axée sur l'amélioration continue des systèmes. L'étape qui aurait pu suivre serait d'inclure clients et fournisseurs dans ce type de projet afin de traiter des problèmes relatifs à l'ensemble du réseau.

Une fois le projet Mitacs terminé, il a pu être possible de mesurer de nouveau les critères de performance de la recherche actuelle et conclure sur l'effet des cellules dynamiques dans un contexte de réseau. Il a ainsi été possible de voir l'effet de ce mode de fonctionnement sur l'efficacité, mais aussi la flexibilité du réseau. Cela a également permis de valider les résultats obtenus par la simulation à événements discrets effectuées en parallèle.

Orchestrer les changements du début à la fin en organisant les projets, récoltant les ressources et assurant l'avancement et le suivi des activités.

Un rapport a été rédigé à chaque jour dans le but de conserver l'historique des changements apportés dans le temps et y voir les contraintes et succès rencontrés quotidiennement.

Aussi, l'animation des rencontres et la participation et la gestion des projets d'amélioration ont pu assurer le bon déroulement du projet.

5.2 PROJETS D'AMÉLIORATION APPORTÉS

Plusieurs éléments ont permis de faire avancer le projet malgré les embuches du quotidien. L'ouverture et la participation active de la direction dans les projets d'amélioration ont été d'une aide importante. Pour répondre aux problématiques soulevées plus haut, plusieurs projets et outils ont été développés et implantés dans l'entreprise. Une liste de ces projets est présentée en ce sens ici-bas.

5.2.1 Projets plancher 2015

- Méthode d'approvisionnement mixte kanban et kit
 - Diminue la recherche de matériel
 - Permet le custom
 - Augmente la qualité
 - Diminue le manque de pièces
 - Élimination/Réduction du cannibalisme
- Postes dédiés et flexibles
 - Améliore l'efficacité
 - Permet d'utiliser les espaces de travail selon le besoin réel
 - Éventuellement peut-être équiper les postes de certains autres outils pour augmenter la flexibilité
- 5S, Chariots électriques et chariots de mise en route
 - Outils accessibles en tout temps
 - Moins de recherche de matériel
- Aménagement global
 - Optimisation du flux de matière
 - Postes plus clairs et plus définis
 - Environnement plus propre
- Instauration d'un système qualité
 - Récolte des pièces non-conformes
 - Récolte des erreurs à toute étape du processus

- Historique, suivi et actions correctives et préventives des erreurs
- Rien ne rentre dans un poste kanban s'il n'est pas prêt à l'utilisation
- Planification
 - Chevauchement des commandes (optimisation de l'utilisation des ressources)
 - Tableau Gantt
 - Permet de visualiser la production en étape et chronologiquement
 - Permet de prévoir ce qui s'en vient et les problèmes et goulots à venir
 - Permet d'être proactif
- Personnel multidisciplinaire
 - Plus d'autonomie
 - Moins de dépendances à certains employés clés
 - Partage de connaissances
 - Moins bloqué par l'absence d'employé ou la surcharge de travail
- Procédure de validation du cahier des charges
 - Les spécificités techniques sont conformes et connus
 - Une commande n'est pas commencée tant que tout le matériel n'est pas reçu
 - Les erreurs sont réglées dès la réception du matériel
 - Intégration des ventes, de l'ingénierie et de la production
 - Permet à l'ingénierie de se valider à mesure
 - Permet à la production de se valider à mesure (présence de certaines options ou non, valider physiquement les produits, etc.)
- Consommation du matériel par les monteurs
 - Plus d'autonomie
 - Moins de cannibalisme
 - Inventaire d'encours plus représentatif (moins de MP dans les chariots bleus)

- Élaboration et fabrication de roulettes de transport pour les machines
 - Sauve beaucoup de temps pour la manutention des machines
 - Évite d'utiliser le chariot-élévateur
 - Sauve de l'espace pour la manutention
- Rencontres hebdomadaires avec l'équipe de production
 - Améliorer considérablement la communication
 - Favorise le partage et l'exploitation d'idées
 - Sentiment d'appartenance amélioré
 - Améliore la dynamique du groupe et la qualité du travail
 - Les gens se sentent plus concernés par ce qui se passe dans l'entreprise
- Boîtes électriques montées à l'extérieur
 - Plus facile à gérer (standardisation, qualité, etc.)
- Prise de mesures de performance
 - Permet de faire une base pour comparer les améliorations
 - Permet de mieux connaître l'état du plancher et son évolution
 - Permet de prendre des actions correctives et préventives pour améliorer le plancher
- Formation du directeur de production
 - Leadership
 - Organisation personnelle
 - Gestion des employés
 - Gestion de plancher
 - Planification et ordonnancement de la production
- Implantation d'un tableau de communication
 - Favorise l'échange d'information
- Sensibilisation accrue à la propreté de l'environnement de travail et temps accordé aux employés pour le ménage en fin de journée
 - Facilite la recherche
 - Améliore l'ambiance de travail

5.2.2 Projets plancher 2016

- Implanter la planification dans le ERP
 - Facilite la gestion des stocks
 - Facilite la communication avec les ventes
 - Facilite la production
 - Utile pour l'utilisation de l'écran tactile
 - Meilleure autonomie des employés
 - Libère le contre-maître
 - Permet de voir le travail qui est à venir
 - Favorise la consommation du matériel et du temps-homme
- Faire le suivi des projets 2015
 - Permet d'éviter de retourner en arrière
 - Récolter les commentaires pour continuellement s'améliorer
- Favoriser les compétences multiples et l'autonomie
- Planification/Gestion par goulot, Équilibrage des lignes
- Implantation de l'écran tactile
 - Consommation du matériel plus intuitif et plus simple
- Élaboration de procédures de travail et de checklists
 - Favorise le partage de connaissances
 - Évite les erreurs
 - Assure une responsabilisation des employés
 - Aide à la formation
- Amélioration et systématisation du système qualité
 - Créer une routine qualité
 - Prise de mesures
 - Actions correctives et préventives
 - Suivi
 - etc.
 - Implanter un système formel de traitement de la non-qualité

- Faire une procédure de start-up des machines à l'assemblage
 - Décharge le goulot
 - Améliore l'autonomie et la flexibilité des employés
- Amélioration continue
 - Récolter les commentaires et apporter améliorations nécessaires
 - Former/Déformer équipes de résolutions de problèmes
 - Concevoir et fabriquer des bancs de tests pour la production
 - Implanter une procédure de déshabillage des machines
- Implantation d'objectifs SMART et plans d'actions par départements et personnes clés
 - Motive les employés
 - Oriente les actions vers un but commun
 - Offre une mesure de performance précise

Le dernier projet fut l'un des plus simples et efficaces à implanter. Il a permis d'orienter tous les départements dans une même direction et briser le paradigme où chacun fait son travail et le passe au suivant. Un exemple de ces objectifs est fourni au tableau 5-1 suivant.

Dans ce tableau, il est possible de voir les objectifs à relever pour le directeur de production. Ces objectifs sont directement en lien avec la mission de l'entreprise. Dans le cas actuel, l'entreprise vise à avoir les meilleurs délais, la meilleure qualité possible et au meilleur coût possible. L'objectif portant sur l'attitude est, quant à lui, porté sur le développement personnel de l'employé. L'idée derrière cet objectif est de créer une relation gagnant-gagnant entre l'entreprise et ses employés et agir comme agent de motivation et de réalisation de soi.

Tableau 5-1 : Objectifs et plan d'actions pour la production pour l'année 2016

Objectif	Activités pour y arriver	Indicateurs de performance	Cible à atteindre	Moyens de vérification
Respecter les délais de livraisons fixés et éviter les retards	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliser et bien comprendre le système de planification - Intégrer les ventes et l'ingénierie dans les décisions touchant de près ou de loin la production - Faire des suivis avec les achats pour s'assurer d'avoir toutes les pièces nécessaires à la fabrication d'une machine - S'assurer d'avoir toutes les composantes avant d'entamer la fabrication d'une machine - Terminer la machine avant de passer à la prochaine - Interdire le cannibalisme - Gérer convenablement les urgences - Faire preuve de rigueur et d'organisation - Éviter la production de mauvaise qualité par la formation du personnel et le contrôle proactif des erreurs 	<p>Départemental : Pourcentage de machines respectant les délais de production</p> <p>Global : Pourcentage de machines livrées au client à temps</p>	<p>> 95% de délais respectés</p> <p>> 95% de livraisons à temps</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Contrôle mensuel - Statistiques ERP - Rencontre annuelle
Retours de clients	<ul style="list-style-type: none"> - Implantation et amélioration du système qualité - Instaurer des procédures de travail - Élaborer et systématiser l'utilisation de checklists - Sensibiliser les employés à la rigueur et au professionnalisme - Requête de rétroaction/information des vendeurs, ingénierie, mise en route et service 	<p>Pourcentage de machines neuves conformes envoyées au client</p> <p>Pourcentage de mauvaises pièces envoyées au client</p>	<p>> 94% de machines conformes</p> <p>< 2% de retour client par année</p>	
Respect des coûts	<ul style="list-style-type: none"> - Utiliser convenablement les ressources actuelles à l'aide d'un mode de planification efficace - Comprendre et contrôler le plancher - S'assurer que les employés consomment les bonnes pièces, de la bonne manière, en bonne quantité et au bon moment - Produire correctement du premier coup pour éviter les retours en arrières et les modifications de dernières minutes - Éviter toute dépense évitable 	Ratio Ventes/Ressources utilisées	> 7 Millions \$ / 10 employés	
Attitude face aux problèmes	<ul style="list-style-type: none"> - Écouter attentivement chacune des problématiques soulevées - Analyser toutes les alternatives de solution possibles - Consulter directement toutes les personnes impliquées de près ou de loin - Toujours chercher une manière de faire mieux - Toujours remettre en question : Est-ce normal ? Y a-t-il une autre manière de faire ? Est-ce nécessaire ? Pourquoi ? - Travailler en équipe 			

5.3 FACTEURS DE SUCCÈS D'IMPLANTATION

Chacun des projets mentionnés dans la section précédente représentait un défi en soit. Il convient donc de soulever les différents facteurs de succès d'implantation des multiples projets ayant eu lieu dans l'entreprise à l'étude. La liste suivante permet de soulever une partie de ces facteurs de succès.

- Appui et engagement de la haute direction
- Écoute et réceptivité du chargé de projet
- Implication des employés
- Désir de changement et d'amélioration
- Désir de dépassement personnel de la part de plusieurs employés
- Liberté et autonomie laissée au chargé de projet
- Mise à disposition des ressources humaines et matérielles
- Écoute et participation actives des employés et cadres
- Intégration de tous les départements dans les prises de décision
- Intégration des fournisseurs dans certains projets
- Structure et organisation du projet
- Compétences de l'équipe chargée des changements
- Objectifs clairs et bien définis
- Contrôle et suivi après chaque étape et chaque projet
- Communication permanente entre toutes les parties prenantes

Ces facteurs ensemble ont permis d'améliorer considérablement l'efficacité et la flexibilité de l'entreprise à l'étude. Sans ces facteurs, il aurait été ardu d'implanter autant de projets d'amélioration et de valider l'impact de ces derniers en interaction avec un aménagement en cellules dynamiques dans un contexte de réseau.

5.4 CONCLUSION DU PROJET MITACS

À la lumière de toutes ces informations, il convient de clarifier et structurer ce qui a été dit dans ce chapitre. Les cellules dynamiques étaient le projet initial proposant l'amélioration de l'efficacité et la flexibilité de l'entreprise réseau. Après l'implantation d'un tel aménagement, il a été remarqué que plusieurs éléments et outils étaient manquants au fonctionnement optimal des cellules. Ces éléments sont les facteurs de succès d'un aménagement en cellules dynamiques. Ils représentent également les projets qui ont suivis l'implantation de l'aménagement. Néanmoins, implanter ce type de projets requiert la présence d'autres éléments : les facteurs de succès d'implantation. Il s'agit de la liste qui a été élaborée à la dernière section. L'image suivante clarifie cette idée.

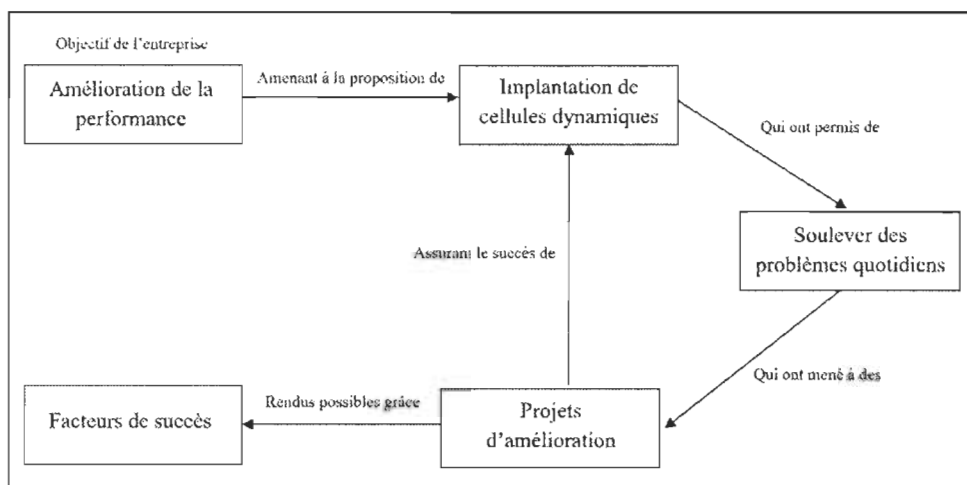


Figure 5-2 : Relations entre les projets et les facteurs de succès

Une entrevue avec l'entreprise à la fin du processus d'implantation a permis de discuter sur l'effet des cellules dynamiques. Une expérience de validation a également permis d'appuyer les résultats discutés. À la suite du projet, le temps de passage est passé d'environ 51,4 heures à 38,1 heures (réduction de 25,8%). Le nombre de produits

fabriqués par année est passé de 156 à 178 (augmentation de 13,4%). Le nombre d'encours est également passé de 4 à 3,5 commandes sur le plancher en moyenne (réduction de 12,5%). Le temps de réaction est passé de 59,0 heures à 45,1 heures (réduction de 23,5%). Une meilleure organisation globale, une communication plus efficace et intégratrice, une meilleure planification, une mise en place de systèmes d'amélioration et de qualité et le changement de mentalité dans l'ensemble de l'entreprise ont été les principaux facteurs qui ont amené à ces résultats. La participation active de la haute direction et de l'ensemble des employés a été salubre à ce projet. Il est finalement à noter que l'implantation réelle n'impliquait pas la conception modulaire de niveau 1 de la nomenclature. C'est, entre autres, ce qui explique la différence entre les résultats réels et les résultats proposés par la combinaison optimale suggérée au chapitre 4. Les résultats de simulation de la situation suivant le projet Mitacs est fourni à l'annexe VII.

CONCLUSION

L'amélioration de la performance des réseaux est une question importante pour les petites et moyennes entreprises si elles désirent survivre à la concurrence mondiale. Le dynamisme du marché et l'incertitude de la demande obligent à concilier productivité et flexibilité. Les auteurs ont prouvé que les cellules dynamiques permettaient rallier ces deux objectifs. Néanmoins, aucun pont n'a été fait entre les chaînes d'approvisionnement et l'utilisation des DCMS. La revue de littérature a permis de mettre en lumière des éléments inhérents aux deux concepts. L'accès aux connaissances et aux ressources, l'intégration et la bonne communication, l'intérêt envers la réduction des coûts, la productivité et la flexibilité de même que l'adaptabilité aux changements et fluctuations de l'environnement n'en sont que quelques exemples.

Un design expérimental suivi par une simulation Monte-Carlo a permis d'étudier un cas réel et conclure sur les effets de l'utilisation des DCMS sur la performance des réseaux. La simulation démontre que l'interdisciplinarité, la présence d'une structure modulaire, une production en cellules dynamiques, un nombre d'employés suffisant, un système d'alimentation en kanban et une fiabilité des fournisseurs de près de 99% permettent d'optimiser le temps de réaction, le nombre d'encours, le temps de passage et les ventes totales. L'implantation en situation réelle a également permis d'appuyer ces résultats.

Cette recherche a permis d'aborder plusieurs questions qui concernent la performance des réseaux. Les résultats récoltés par cette étude démontrent l'intérêt à porter aux structures modulaires. Cette méthode de conception amène à la possibilité d'implanter et utiliser les cellules dynamiques tout en participant à en assurer son succès. Les cellules de travail dynamiques pourraient ensuite être développées dans les réseaux au niveau des

fournisseurs de modules. Ces fournisseurs alimenteraient alors une ligne d'assemblage mixte où y passerait toute sorte de produits qui varieraient tant en termes de volume qu'au niveau du mix-produit. Cette idée passe d'abord par la standardisation des composantes. Seulement après, il sera possible d'implanter la conception modulaire et un réseau formé de fournisseurs travaillant en cellules dynamiques et un donneur d'ordre exploitant une ligne d'assemblage mixte.

Plusieurs facteurs ont pu être négligés dans cette recherche comme l'horizon de planification, l'ordonnancement de la production, la présence de plusieurs produits différents sur la ligne, l'étude d'un réseau plus élaboré, le système de communication et la sous-traitance. Un intérêt porté à ces facteurs et autres mesures de performance pourrait ouvrir la porte à d'éventuelles recherches.

LISTE DES RÉFÉRENCES

7.1 ARTICLES SCIENTIFIQUES

Ali, R. M., Deif, A. M. (2014) Dynamic lean assessment for takt time implementation *Proceedings of the 47th CIRP Conference on Manufacturing Systems, Volume 17*, pp. 577–581

Anvari, A. and al. (2011) Performance measurement system through supply chain management to lean manufacturing. *World Applied Sciences Journal, Volume 14*, No. 2, pp. 285-292

Beamon, B. M. (1999) Measuring supply chain performance. *International Journal of Operations & Production Management, Volume 19* No. 3, pp.275 - 292

Bulsara, H. P., Qureshi, M. N., Patel, H. (2014) Supply chain performance measurement - An exploratory study. *International Journal of Logistics Systems and Management, Volume 18*, No. 2, pp.231–249.

Christopher, M.; Ryals, L. J. (2014) The supply chain becomes the demand chain. *Journal of Business Logistics, Volume 35*, No. 1, pp. 29–35

Darkov, I., Naydenov, P. (2011). Factors that influence the success of the practical implementation of virtual cellular manufacturing system. *Societal studies, Volume 3*, No. 1, pp.95-106

De Loecker, J. and P. K. Goldberg (2014). Firm performance in a global market. *Annual Review of Economics, Volume 6*, pp. 201-227

Drolet, J., Marcoux, Y., Abdulnour, G. (2008). Simulation-based performance comparison between dynamic cells, classical cells and job shops : a case study. *International Journal of Production Research*, Volume 46, No.2, p.509-536

Feng, T., Zhang, F. (2013) The Impact of Modular Assembly on Supply Chain Efficiency. *Production and Operations Management*, Volume 23, Issue 11, pages 1985–2001

Ghotboddini, M. M., Rabbani, M., Rahimian, H. (2011) A comprehensive dynamic cell formation design: Benders' decomposition approach. *Expert Systems with Applications*, Volume 38, Issue 3, pp. 2478–2488

Gunasekaran, A., Kobu, B. (2007) Performance measures and metrics in logistics and supply chain management: A review of recent literature (1995-2004) for research and applications. *International Journal of Production Research*, Volume 45, No. 12, pp. 2819-2840

Ip, W. H., Chan, S. L., Lam, C. Y. (2011) Modeling supply chain performance and stability. *Industrial Management & Data Systems*, Volume 111, No. 8, pp.1332 - 1354

Kearney, S., Abdul-Nour, G. (2004) SME and quality performance in networking environment. *Computers & Industrial Engineering*, Volume 46, No. 4, pp. 905–909

Kia, R. et al. (2012) Solving a group layout design model of a dynamic cellular manufacturing system with alternative process routings, lot splitting and flexible reconfiguration by simulated annealing. *Computers & Operations Research*, Volume 39, No. 11, pp. 2642–2658

Li, W., Hu, L., Murata, T. (2011) Production planning in dynamic cellular manufacturing system using optimization of cell reconfiguration planning time horizon with uncertain

demand. *IEEE International Conference on Automation and Logistics (ICAL)*, 15-16 août 2011, pp.466-470

Martin, P.R., Patterson, J.W. (2009) On measuring company performance within a supply chain. *International Journal of Production Research*, Volume 47, No. 9, pp. 2449-2460

McCormack, K. and al. (2008) Supply chain maturity and performance in Brazil. *Supply Chain Management*, Volume 13, No. 4, pp. 272-282

Mentzer, J.T., and al. (2001) Defining Supply Chain Management. *Journal of Business Logistics*, Volume 2, No. 2, pp. 1-25

Paydar, M. M., Saidi-Mehrabad, M., Kia, R. (2013) Designing a new integrated model for dynamic cellular manufacturing systems with production planning and intra-cell layout. *International Journal of Applied Decision Sciences (IJADS)*, Volume 6, No. 2

Purvis, L., Gosling, J., Naim, M. M. (2014) The development of a lean, agile and leagile supply network taxonomy based on differing types of flexibility. *International Journal of Production Economics*, Volume 151, pp. 100–111

Rheault M., Drolet J. R., Abdalnour G. (1996). Les Cellules Dynamiques : Un Concept pour PME. *3e Congrès International Francophone de la PME (CIFPME 96)*, 23-25 octobre 1996, Université du Québec à Trois-Rivières, pp 955-968

Rheault, M., Drolet, J. R., Abdalnour, G. (1995). Physically reconfigurable virtual cells : A dynamic model for a highly dynamic environment. *Proceedings of the 17th International Conference on Computers and Industrial Engineering*, Volume 29, No.1-4, p.221-225

Rheault, M., Drolet, J. R., Abdulnour, G. (1996). Dynamic Cellular Manufacturing System (DCMS). *Proceedings of the 19th International Conference on Computers and Industrial Engineering, Volume 31, Issues 1-2, P.143-146*

Safaei, N., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2009). Integrated multi-period cell formation and subcontracting production planning in dynamic cellular manufacturing systems. *International Journal of Production Economics, Volume 120, No. 2, Pages 301–314*

Saxena, L. K., Jain, P. K. (2011) Dynamic cellular manufacturing systems design - A comprehensive model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Volume 53, No. 1-4, pp 11-34*

Shepherd, C., Günter, H. (2011) Measuring supply chain performance: Current research and future directions. *International Journal of Productivity and Performance Management, Volume 55, No. 3/4, pp. 242-258*

Soolaki, M. (2012) A multi-objective integrated cellular manufacturing systems design with production planning, worker assignment and dynamic system reconfiguration. *International Journal of Industrial and Systems Engineering, Volume 12, No. 3, pp.280-300*

Soolaki, M., Izadi, A. (2013) A robust optimisation model for manufacturing cell design problem under uncertainty. *International Journal of Services and Operations Management, Volume 15, No.2, pp.238 - 258*

Tan, Y., Ma, S. H., Gong, F. M. (2007) Empirical study on impact of logistics operations capability on supply chain performance. *International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 21-25 septembre 2007, pp. 4760-4766*

Tavakkoli-Moghaddam, R., Sakhaii, M., Vatani, B. (2014) A robust model for a dynamic cellular manufacturing system with production planning. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, Volume 27, No. 4, pp. 587-598

Yamchello, H. T. and al. (2014) A review of the critical success factors in the adoption of lean production system by small and medium sized enterprises. *Applied Mechanics and Materials*, Volume 564, Chapter 8: Industrial Engineering, pp. 627-631

Yoon, T. and al. (2002) Knowledge fusion among the virtual production enterprises within the technology information infrastructure environment. *IEEE International Engineering Management Conference*, Volume 1, pp. 35-40

Zhang, M., Qi, Y. (2013) Impact of supply chain strategy on mass customisation implementation and effectiveness: Evidence from China. *International Journal of Information and Decision Sciences*, Volume 5, No.4, pp.393 - 413

7.2 OUVRAGES

Jaber M. Y. (2011). *Learning curves : Theory, models and applications*. CRC Press, Industrial Innovation Series, p.476

Poulin D., Montreuil B. and Gauvin S. (1994). *L'entreprise réseau: bâtir aujourd'hui l'organisation de demain*. Montréal, Publi-Relais, p.335

Sushil et Stohr E. A. (2013) *The Flexible Enterprise (Flexible Systems Management)* (Édition 2013). Springer, p.374

Tompkins J. A., White J. A., Bozer Y. A. and Tanchoco J. M. A. (2010). *Facilities Planning*. (4ème édition) Wiley, p.864

7.3 SITES WEB

Industrie Canada (2012) "Recherche et statistique sur la PME", [En ligne], consulté le 06-12-2014 <<https://www.ic.gc.ca/eic/site/061.nsf/fra/01278.html>>

Houtart F. (2007) "Les effets de la mondialisation", [En ligne], consulté le 06-12-2014 <<http://www.cetri.be/spip.php?article79>>

Hulten, C. R. (2001). Total factor productivity. A short biography. In *New developments in productivity analysis* (pp. 1-54). University of Chicago Press, [En ligne], consulté le 06-12-2014 <<http://www.nber.org/chapters/c10122.pdf>>

Perny P., Spanjarrrd O., (2005) Optimisation robuste. *Universite Paris 6*, [En ligne], consulté le 06-12-2014 <<https://www-master.ufr-info-p6.jussieu.fr/2005/IMG/pdf/rhad6.pdf>>

Radio-Canada (2006), Des propos qui font vague. Dans *Radio-Canada Nouvelles*, [En ligne], consulté le 10-12-2014 <<http://www.radio-canada.ca/nouvelles/societe/2006/10/17/006-reax-propos-bouchard.shtml>>

The Open Group (2014), Maximizing the Value of Cloud for Small-Medium Enterprises :Key SME Characteristics (Business and IT), [En ligne], consulté le 06-12-2014 <http://www.opengroup.org/cloud/cloud/cloud_sme/characteristics.htm>

ANNEXE I

PLAN L18

Tableau ANNEXE I-1 : Plan L18

Expérience	Interdisciplinarité	Structure Modulaire	Type de production	Alimentation	Demande (Volume)	Nombre d'employés	Livraison à Temps	Erreur
7	Aucun	1er Niveau BOM	Fixe	Kanban	0,5	+1	0,95	3
4	Aucun	2e Niveau BOM	Fixe	Bac	1	=	0,99	3
17	Toutes	1er Niveau BOM	Équipe	Bac	1,5	-1	0,95	3
16	Toutes	1er Niveau BOM	Fixe	Ress. + Montage	1	+1	0,9	2
18	Toutes	1er Niveau BOM	Cellules	Kanban	0,5	=	0,99	1
14	Toutes	2e Niveau BOM	Équipe	Ress. + Montage	0,5	=	0,9	3
7	Aucun	1er Niveau BOM	Fixe	Kanban	0,5	+1	0,95	3
15	Toutes	2e Niveau BOM	Cellules	Bac	1	+1	0,95	1
1	Aucun	Aucun	Fixe	Bac	0,5	-1	0,9	1
15	Toutes	2e Niveau BOM	Cellules	Bac	1	+1	0,95	1
14	Toutes	2e Niveau BOM	Équipe	Ress. + Montage	0,5	=	0,9	3
4	Aucun	2e Niveau BOM	Fixe	Bac	1	=	0,99	3
11	Toutes	Aucun	Équipe	Bac	0,5	+1	0,99	2
5	Aucun	2e Niveau BOM	Équipe	Kanban	1,5	+1	0,9	1
9	Aucun	1er Niveau BOM	Cellules	Bac	1,5	=	0,9	2
11	Toutes	Aucun	Équipe	Bac	0,5	+1	0,99	2
3	Aucun	Aucun	Cellules	Ress. + Montage	1,5	+1	0,99	3
4	Aucun	2e Niveau BOM	Fixe	Bac	1	=	0,99	3
13	Toutes	2e Niveau BOM	Fixe	Kanban	1,5	-1	0,99	2
17	Toutes	1er Niveau BOM	Équipe	Bac	1,5	-1	0,95	3
6	Aucun	2e Niveau BOM	Cellules	Ress. + Montage	0,5	-1	0,95	2
3	Aucun	Aucun	Cellules	Ress. + Montage	1,5	+1	0,99	3
13	Toutes	2e Niveau BOM	Fixe	Kanban	1,5	-1	0,99	2
18	Toutes	1er Niveau BOM	Cellules	Kanban	0,5	=	0,99	1
2	Aucun	Aucun	Équipe	Kanban	1	=	0,95	2
8	Aucun	1er Niveau BOM	Équipe	Ress. + Montage	1	-1	0,99	1

Tableau ANNEXE I-2 : Plan L18 (suite)

Expérience	Interdisciplinarité	Structure Modulaire	Type de production	Alimentation	Demande (Volume)	Nombre d'employés	Livraison à Temps	Erreur
12	Toutes	Aucun	Cellules	Kanban	1	-1	0,9	3
16	Toutes	1er Niveau BOM	Fixe	Ress. + Montage	1	+1	0,9	2
16	Toutes	1er Niveau BOM	Fixe	Ress. + Montage	1	+1	0,9	2
6	Aucun	2e Niveau BOM	Cellules	Ress. + Montage	0,5	-1	0,95	2
7	Aucun	1er Niveau BOM	Fixe	Kanban	0,5	+1	0,95	3
2	Aucun	Aucun	Équipe	Kanban	1	=	0,95	2
13	Toutes	2e Niveau BOM	Fixe	Kanban	1,5	-1	0,99	2
8	Aucun	1er Niveau BOM	Équipe	Ress. + Montage	1	-1	0,99	1
15	Toutes	2e Niveau BOM	Cellules	Bac	1	+1	0,95	1
9	Aucun	1er Niveau BOM	Cellules	Bac	1,5	=	0,9	2
14	Toutes	2e Niveau BOM	Équipe	Ress. + Montage	0,5	=	0,9	3
5	Aucun	2e Niveau BOM	Équipe	Kanban	1,5	+1	0,9	1
6	Aucun	2e Niveau BOM	Cellules	Ress. + Montage	0,5	-1	0,95	2
5	Aucun	2e Niveau BOM	Équipe	Kanban	1,5	+1	0,9	1
10	Toutes	Aucun	Fixe	Ress. + Montage	1,5	=	0,95	1
1	Aucun	Aucun	Fixe	Bac	0,5	-1	0,9	1
12	Toutes	Aucun	Cellules	Kanban	1	-1	0,9	3
14	Toutes	2e Niveau BOM	Équipe	Ress. + Montage	0,5	=	0,9	3
2	Aucun	Aucun	Équipe	Kanban	1	=	0,95	2
9	Aucun	1er Niveau BOM	Cellules	Bac	1,5	=	0,9	2
10	Toutes	Aucun	Fixe	Ress. + Montage	1,5	=	0,95	1
17	Toutes	1er Niveau BOM	Équipe	Bac	1,5	-1	0,95	3
10	Toutes	Aucun	Fixe	Ress. + Montage	1,5	=	0,95	1
3	Aucun	Aucun	Cellules	Ress. + Montage	1,5	+1	0,99	3
12	Toutes	Aucun	Cellules	Kanban	1	-1	0,9	3
5	Aucun	2e Niveau BOM	Équipe	Kanban	1,5	+1	0,9	1
1	Aucun	Aucun	Fixe	Bac	0,5	-1	0,9	1
18	Toutes	1er Niveau BOM	Cellules	Kanban	0,5	=	0,99	1
3	Aucun	Aucun	Cellules	Ress. + Montage	1,5	+1	0,99	3
15	Toutes	2e Niveau BOM	Cellules	Bac	1	+1	0,95	1
12	Toutes	Aucun	Cellules	Kanban	1	-1	0,9	3
2	Aucun	Aucun	Équipe	Kanban	1	=	0,95	2
10	Toutes	Aucun	Fixe	Ress. + Montage	1,5	=	0,95	1

Tableau ANNEXE I-3 : Plan L18 (suite)

Expérience	Interdisciplinarité	Structure Modulaire	Type de production	Alimentation	Demande (Volume)	Nombre d'employés	Livraison à Temps	Erreur
8	Aucun	1er Niveau BOM	Équipe	Ress. + Montage	1	-1	0,99	1
6	Aucun	2e Niveau BOM	Cellules	Ress. + Montage	0,5	-1	0,95	2
11	Toutes	Aucun	Équipe	Bac	0,5	+1	0,99	2
5	Aucun	2e Niveau BOM	Équipe	Kanban	1,5	+1	0,9	1
17	Toutes	1er Niveau BOM	Équipe	Bac	1,5	-1	0,95	3
4	Aucun	2e Niveau BOM	Fixe	Bac	1	=	0,99	3
8	Aucun	1er Niveau BOM	Équipe	Ress. + Montage	1	-1	0,99	1
7	Aucun	1er Niveau BOM	Fixe	Kanban	0,5	+1	0,95	3
9	Aucun	1er Niveau BOM	Cellules	Bac	1,5	=	0,9	2
1	Aucun	Aucun	Fixe	Bac	0,5	-1	0,9	1
10	Toutes	Aucun	Fixe	Ress. + Montage	1,5	=	0,95	1
2	Aucun	Aucun	Équipe	Kanban	1	=	0,95	2
15	Toutes	2e Niveau BOM	Cellules	Bac	1	+1	0,95	1
16	Toutes	1er Niveau BOM	Fixe	Ress. + Montage	1	+1	0,9	2
3	Aucun	Aucun	Cellules	Ress. + Montage	1,5	+1	0,99	3
4	Aucun	2e Niveau BOM	Fixe	Bac	1	=	0,99	3
13	Toutes	2e Niveau BOM	Fixe	Kanban	1,5	-1	0,99	2
17	Toutes	1er Niveau BOM	Équipe	Bac	1,5	-1	0,95	3
11	Toutes	Aucun	Équipe	Bac	0,5	+1	0,99	2
14	Toutes	2e Niveau BOM	Équipe	Ress. + Montage	0,5	=	0,9	3
8	Aucun	1er Niveau BOM	Équipe	Ress. + Montage	1	-1	0,99	1
11	Toutes	Aucun	Équipe	Bac	0,5	+1	0,99	2
16	Toutes	1er Niveau BOM	Fixe	Ress. + Montage	1	+1	0,9	2
6	Aucun	2e Niveau BOM	Cellules	Ress. + Montage	0,5	-1	0,95	2
18	Toutes	1er Niveau BOM	Cellules	Kanban	0,5	=	0,99	1
12	Toutes	Aucun	Cellules	Kanban	1	-1	0,9	3
1	Aucun	Aucun	Fixe	Bac	0,5	-1	0,9	1
13	Toutes	2e Niveau BOM	Fixe	Kanban	1,5	-1	0,99	2
9	Aucun	1er Niveau BOM	Cellules	Bac	1,5	=	0,9	2
7	Aucun	1er Niveau BOM	Fixe	Kanban	0,5	+1	0,95	3
18	Toutes	1er Niveau BOM	Cellules	Kanban	0,5	=	0,99	1

ANNEXE II

RÉSULTATS PLAN L18

Tableau ANNEXE II-1 : Résultats Plan L18

Expérience	Temps de passage	Temps de réaction	Quantité sortante	Nombre d'encours
7	25,0414	31,6806	897	3,9193
4	38,4589	43,9589	880	4
17	29,2666	35,576	557	2
16	24,6619	33,9322	856	4,0237
18	22,2667	25,6594	841	3,2172
14	32,5879	57,4709	711	2,6971
7	25,5107	32,582	858	3,8134
15	32,9824	45,4678	891	4,4453
1	49,3513	74,1395	547	3
15	34,6026	47,3814	854	4,5525
14	32,4089	56,0677	705	2,6989
4	38,9815	44,5066	915	4
11	40,7123	48,2068	582	2,7993
5	28,8317	46,7753	627	2
9	21,5115	30,3955	896	2,8049
11	41,6703	48,4609	571	2,8126
3	46,6454	63,1332	716	3,7584
4	38,4964	44,3521	913	4
13	39,8291	45,1616	814	3,7332
17	27,2005	33,115	596	2
6	34,3537	55,314	712	2,7147
3	45,1534	62,0687	733	3,7439
13	40,0054	45,8319	814	3,7454
18	22,274	25,9507	846	3,2444
2	37,3472	55,5296	481	2
8	21,1595	31,0335	752	1,8375

Tableau ANNEXE II-2 : Résultats Plan LI8 (suite)

Expérience	Temps de passage	Temps de réaction	Quantité sortante	Nombre d'encours
12	48,0649	71,5487	569	3,314
16	25,2922	35,4692	897	4,0942
16	24,5604	33,8777	897	4,0558
6	34,2035	56,0566	704	2,7244
7	24,9205	31,478	865	3,917
2	36,4774	54,1187	493	2
13	40,0989	45,5599	797	3,696
8	23,381	34,2804	681	1,8482
15	34,1416	45,7967	916	4,4715
9	22,6584	32,2019	878	2,9046
14	32,8929	57,6493	703	2,7011
5	30,3479	48,6024	592	2
6	34,4083	56,2876	707	2,7262
5	29,0808	47,4698	618	2
10	52,6293	78,2121	865	5,173
1	49,7828	73,9778	539	3
12	46,8074	71,0531	586	3,2918
14	32,4709	57,016	709	2,6953
2	35,4728	53,8917	507	2
9	23,6252	32,8184	854	2,9264
10	50,924	76,1133	893	5,1826
17	26,5124	31,9629	609	2
10	52,2741	76,6413	845	5,2144
3	45,9225	61,9016	726	3,7184
12	47,185	70,8977	590	3,2952
5	28,3153	46,4696	633	2
1	49,371	73,6627	545	3
18	21,753	25,0326	912	3,1548
3	46,3273	63,2327	719	3,7479
15	32,9517	45,702	908	4,3507
12	48,4189	72,2476	572	3,2792
2	36,3305	54,1319	494	2
10	50,1361	74,7931	873	5,1971

Tableau ANNEXE II-3 : Résultats Plan L18 (suite)

Expérience	Temps de passage	Temps de réaction	Quantité sortante	Nombre d'encours
8	22,802	33,3624	703	1,8468
6	34,143	55,2234	710	2,7532
11	44,9731	52,1457	534	2,8068
5	29,8692	48,2761	606	2
17	28,5901	34,9225	570	2
4	37,8835	43,3397	874	4
8	22,8226	32,8303	706	1,8898
7	24,6431	31,396	950	3,7542
9	22,9836	31,6748	900	2,9204
1	50,3961	74,7371	535	3
10	52,0088	77,3089	892	5,2186
2	37,2027	55,7753	486	2
15	33,6303	45,346	894	4,4774
16	24,6595	34,6766	891	4,0507
3	45,3036	61,4894	739	3,7253
4	38,687	44,3006	914	4
13	38,3585	43,3089	842	3,7048
17	29,0337	34,8451	557	2
11	40,984	48,1833	578	2,7834
14	33,0126	56,8234	696	2,6914
8	22,5069	32,7666	710	1,8509
11	40,3954	47,165	591	2,8277
16	24,8825	33,8573	900	4,199
6	34,2257	55,4952	714	2,7167
18	21,6223	24,9292	869	3,1631
12	47,7182	71,4129	573	3,2922
1	50,0966	74,3451	540	3
13	39,1999	44,8146	821	3,7361
9	22,1285	31,1979	850	2,8941
7	25,153	32,6067	885	3,9117
18	21,1727	24,1954	893	3,0857

ANNEXE III

ANOVA ET TEST DE TUKEY PLAN L18

General Linear Model: Temps de pas versus Interdiscipli; Structure Mo; ...

Factor	Type	Levels	Values
Interdisciplinarité	fixed	2	Aucun; Toutes
Structure Modulaire	fixed	3	1er Niveau BOM; 2e Niveau BOM; Aucun
Type de production	fixed	3	Cellules; Équipe; Fixe
Alimentation	fixed	3	Bac; Kanban; Ress. + Montage
Nb Employes	fixed	3	-1; +1; =
Livraison à Temps	fixed	3	0,90; 0,95; 0,99

Analysis of Variance for Temps de passage, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Interdisciplinarité	1	81,24	81,24	81,24	22,25	0,000
Structure Modulaire	2	6859,17	6859,17	3429,59	939,36	0,000
Type de production	2	622,14	622,14	311,07	85,20	0,000
Alimentation	2	100,01	100,01	50,01	13,70	0,000
Nb Employes	2	221,78	221,78	110,89	30,37	0,000
Livraison à Temps	2	4,63	4,63	2,32	0,63	0,533
Error	78	284,78	284,78	3,65		
Total	89	8173,76				

S = 1,91076 R-Sq = 96,52% R-Sq(adj) = 96,02%

Unusual Observations for Temps de passage

Obs	Temps de passage	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
10	35,4728	39,4345	0,6977	-3,9617	-2,23 R
82	29,2666	25,3970	0,6977	3,8696	2,18 R
84	29,0337	25,3970	0,6977	3,6367	2,04 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Interdisciplinarité	N	Mean	Grouping
Toutes	45	35,7	A
Aucun	45	33,8	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Structure			
Modulaire	N	Mean	Grouping
Aucun	30	45,5	A
2e Niveau BOM	30	34,6	B
1er Niveau BOM	30	24,2	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Type de production			
	N	Mean	Grouping
Fixe	30	38,2	A
Cellules	30	34,3	B
Équipe	30	31,8	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Alimentation			
	N	Mean	Grouping
Bac	30	35,7	A
Ress. + Montage	30	35,3	A
Kanban	30	33,3	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Nb Employes			
	N	Mean	Grouping
-1	30	37,0	A
=	30	34,0	B
+1	30	33,4	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Livraison à Temps			
	N	Mean	Grouping
0,99	30	35,0	A
0,95	30	34,9	A
0,90	30	34,5	A

Means that do not share a letter are significantly different.

General Linear Model: Temps de réa versus Interdiscipl; Structure Mo; ...

Factor	Type	Levels	Values
Interdisciplinarité	fixed	2	Aucun; Toutes
Structure Modulaire	fixed	3	1er Niveau BOM; 2e Niveau BOM; Aucun
Type de production	fixed	3	Cellules; Équipe; Fixe
Alimentation	fixed	3	Bac; Kanban; Ress. + Montage
Nb Employes	fixed	3	-1; +1; =
Livraison à Temps	fixed	3	0,90; 0,95; 0,99

Analysis of Variance for Temps de réaction, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Interdisciplinarité	1	3,2	3,2	3,2	0,34	0,561
Structure Modulaire	2	16362,8	16362,8	8181,4	875,93	0,000
Type de production	2	405,6	405,6	202,8	21,71	0,000
Alimentation	2	967,7	967,7	483,9	51,80	0,000
Nb Employes	2	746,1	746,1	373,1	39,94	0,000
Livraison à Temps	2	1474,5	1474,5	737,2	78,93	0,000
Error	78	728,5	728,5	9,3		
Total	89	20688,3				

S = 3,05617 R-Sq = 96,48% R-Sq(adj) = 95,98%

Unusual Observations for Temps de réaction

Obs	Temps de réaction	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
7	54,1319	60,2265	1,1160	-6,0946	-2,14 R
8	54,1187	60,2265	1,1160	-6,1078	-2,15 R
10	53,8917	60,2265	1,1160	-6,3348	-2,23 R
78	33,8777	39,8106	1,1160	-5,9329	-2,09 R
79	33,9322	39,8106	1,1160	-5,8784	-2,07 R
80	33,8573	39,8106	1,1160	-5,9533	-2,09 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Interdisciplinarité	N	Mean	Grouping
Toutes	45	48,7	A
Aucun	45	48,3	A

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Structure	N	Mean	Grouping
Modulaire	30	64,7	A
Aucun	30	49,2	B
2e Niveau BOM	30	31,7	C
1er Niveau BOM	30		

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Type de production	N	Mean	Grouping
Fixe	30	51,0	A
Cellules	30	48,7	B
Équipe	30	45,8	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Alimentation	N	Mean	Grouping
Ress. + Montage	30	53,1	A
Bac	30	46,5	B
Kanban	30	45,9	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Nb Employees	N	Mean	Grouping
-1	30	52,2	A
=	30	48,2	B
+1	30	45,2	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Livraison à Temps	N	Mean	Grouping
0,90	30	52,7	A
0,95	30	49,8	B
0,99	30	43,0	C

Means that do not share a letter are significantly different.

General Linear Model: Quantité sor versus Interdiscipli; Structure Mo; ...

Factor	Type	Levels	Values
Interdisciplinarité	fixed	2	Aucun; Toutes
Structure Modulaire	fixed	3	1er Niveau BOM; 2e Niveau BOM; Aucun
Type de production	fixed	3	Cellules; Équipe; Fixe
Alimentation	fixed	3	Bac; Kanban; Ress. + Montage
Nb Employes	fixed	3	-1; +1; =
Livraison à Temps	fixed	3	0,90; 0,95; 0,99

Analysis of Variance for Quantité sortante, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Interdisciplinarité	1	27598	27598	27598	15,95	0,000
Structure Modulaire	2	508251	508251	254125	146,90	0,000
Type de production	2	713126	713126	356563	206,12	0,000
Alimentation	2	53848	53848	26924	15,56	0,000
Nb Employes	2	292794	292794	146397	84,63	0,000
Livraison à Temps	2	65487	65487	32744	18,93	0,000
Error	78	134929	134929	1730		
Total	89	1796033				

S = 41,5916 R-Sq = 92,49% R-Sq(adj) = 91,43%

Unusual Observations for Quantité sortante

Obs	Quantité sortante	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
40	752,000	646,211	15,187	105,789	2,73 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Interdisciplinarité	N	Mean	Grouping
Toutes	45	752,9	A
Aucun	45	717,9	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Structure	N	Mean	Grouping
Modulaire			
1er Niveau BOM	30	802,5	A
2e Niveau BOM	30	773,1	B
Aucun	30	630,5	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Type de production	N	Mean	Grouping
Fixe	30	818,5	A
Cellules	30	775,7	B
Équipe	30	611,9	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Alimentation	N	Mean	Grouping
Ress. + Montage	30	768,8	A
Bac	30	726,3	B
Kanban	30	711,0	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Nb Employes	N	Mean	Grouping
=	30	786,3	A
+1	30	764,1	A
-1	30	655,7	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Livraison à Temps	N	Mean	Grouping
0,99	30	766,2	A
0,95	30	739,4	B
0,90	30	700,5	C

Means that do not share a letter are significantly different.

General Linear Model: WIP versus Interdisciplinary; Structure Modulaire; ...

Factor	Type	Levels	Values
Interdisciplinarité	fixed	2	Aucun; Toutes
Structure Modulaire	fixed	3	1er Niveau BOM; 2e Niveau BOM; Aucun
Type de production	fixed	3	Cellules; Équipe; Fixe
Alimentation	fixed	3	Bac; Kanban; Ress. + Montage
Nb Employes	fixed	3	-1; +1; =
Livraison à Temps	fixed	3	0,90; 0,95; 0,99

Analysis of Variance for WIP, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Interdisciplinarité	1	7,9834	7,9834	7,9834	159,04	0,000
Structure Modulaire	2	2,2021	2,2021	1,1011	21,94	0,000
Type de production	2	47,5808	47,5808	23,7904	473,95	0,000
Alimentation	2	2,1008	2,1008	1,0504	20,93	0,000
Nb Employes	2	8,6697	8,6697	4,3349	86,36	0,000
Livraison à Temps	2	2,1874	2,1874	1,0937	21,79	0,000
Error	78	3,9153	3,9153	0,0502		
Total	89	74,6394				

S = 0,224044 R-Sq = 94,75% R-Sq(adj) = 94,01%

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Interdisciplinarité	N	Mean	Grouping
Toutes	45	3,5	A
Aucun	45	2,9	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Structure	N	Mean	Grouping
Modulaire			
Aucun	30	3,3	A
2e Niveau BOM	30	3,3	A
1er Niveau BOM	30	3,0	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Type de production	N	Mean	Grouping
Fixe	30	4,0	A

Cellules	30	3,4	B
Équipe	30	2,2	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Alimentation	N	Mean	Grouping
Ress. + Montage	30	3,4	A
Bac	30	3,2	B
Kanban	30	3,0	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Nb			
Employes	N	Mean	Grouping
+1	30	3,5	A
=	30	3,3	B
-1	30	2,8	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Livraison			
à Temps	N	Mean	Grouping
0,95	30	3,4	A
0,99	30	3,2	B
0,90	30	3,0	C

Means that do not share a letter are significantly different.

ANNEXE IV

PLAN COMPLET

Tableau ANNEXE IV-1 : Plan complet

Expérience	Interdisciplinarité	Structure Modulaire	Type de Production	Alimentation	Livraison à temps
1	Aucun	1er niveau	Cellules	Bac	99
2	Aucun	1er niveau	Cellules	Bac	90
3	Aucun	1er niveau	Cellules	Kanban	90
4	Toutes	Aucun	Cellules	Bac	90
5	Aucun	1er niveau	Fixe	Bac	90
6	Toutes	Aucun	Cellules	Bac	99
7	Aucun	1er niveau	Fixe	Kanban	90
8	Toutes	1er niveau	Fixe	Kanban	99
9	Aucun	Aucun	Cellules	Bac	99
10	Toutes	1er niveau	Cellules	Kanban	90
11	Toutes	Aucun	Cellules	Bac	90
12	Aucun	1er niveau	Fixe	Bac	99
13	Toutes	Aucun	Fixe	Kanban	99
14	Toutes	1er niveau	Cellules	Bac	99
15	Toutes	1er niveau	Fixe	Bac	90
16	Toutes	1er niveau	Fixe	Bac	99
17	Toutes	1er niveau	Cellules	Kanban	99
18	Aucun	Aucun	Fixe	Bac	99
19	Toutes	1er niveau	Fixe	Bac	99
20	Toutes	1er niveau	Fixe	Kanban	99
21	Aucun	Aucun	Fixe	Bac	99
22	Aucun	Aucun	Cellules	Kanban	99
23	Toutes	Aucun	Fixe	Kanban	90
24	Toutes	Aucun	Cellules	Bac	99
25	Toutes	1er niveau	Fixe	Kanban	90
26	Toutes	1er niveau	Cellules	Bac	90
27	Toutes	1er niveau	Cellules	Kanban	90
28	Aucun	Aucun	Cellules	Kanban	99

Tableau ANNEXE IV-2 : Plan complet (suite)

Expérience	Interdisciplinarité	Structure Modulaire	Type de Production	Alimentation	Livraison à temps
29	Toutes	Aucun	Fixe	Bac	90
30	Toutes	Aucun	Cellules	Kanban	90
31	Aucun	Aucun	Cellules	Kanban	90
32	Toutes	Aucun	Fixe	Bac	99
33	Toutes	1er niveau	Cellules	Kanban	99
34	Aucun	Aucun	Cellules	Bac	90
35	Toutes	Aucun	Fixe	Bac	99
36	Toutes	Aucun	Fixe	Bac	99
37	Aucun	1er niveau	Fixe	Bac	90
38	Aucun	Aucun	Cellules	Bac	90
39	Toutes	Aucun	Cellules	Kanban	90
40	Toutes	Aucun	Cellules	Kanban	99
41	Aucun	1er niveau	Fixe	Kanban	90
42	Aucun	Aucun	Cellules	Kanban	99
43	Aucun	1er niveau	Fixe	Kanban	99
44	Aucun	1er niveau	Cellules	Kanban	90
45	Aucun	1er niveau	Fixe	Bac	90
46	Toutes	Aucun	Fixe	Bac	90
47	Aucun	1er niveau	Fixe	Kanban	99
48	Toutes	Aucun	Fixe	Kanban	90
49	Aucun	Aucun	Cellules	Bac	99
50	Toutes	Aucun	Cellules	Bac	90
51	Toutes	1er niveau	Cellules	Bac	90
52	Aucun	Aucun	Fixe	Kanban	99
53	Aucun	1er niveau	Cellules	Bac	90
54	Toutes	1er niveau	Fixe	Kanban	99
55	Aucun	1er niveau	Fixe	Kanban	99
56	Toutes	1er niveau	Cellules	Kanban	90
57	Aucun	Aucun	Fixe	Kanban	90
58	Aucun	Aucun	Fixe	Bac	90
59	Toutes	Aucun	Cellules	Bac	99
60	Aucun	Aucun	Cellules	Kanban	90

Tableau ANNEXE IV-3 : Plan complet (suite)

Expérience	Interdisciplinarité	Structure Modulaire	Type de Production	Alimentation	Livraison à temps
61	Aucun	Aucun	Fixe	Bac	99
62	Toutes	1er niveau	Fixe	Bac	90
63	Toutes	Aucun	Cellules	Kanban	90
64	Aucun	Aucun	Fixe	Kanban	99
65	Aucun	1er niveau	Fixe	Bac	90
66	Aucun	Aucun	Fixe	Bac	90
67	Aucun	1er niveau	Fixe	Bac	99
68	Aucun	Aucun	Fixe	Kanban	90
69	Toutes	1er niveau	Fixe	Bac	99
70	Toutes	1er niveau	Fixe	Bac	90
71	Aucun	1er niveau	Cellules	Kanban	90
72	Toutes	Aucun	Fixe	Kanban	90
73	Toutes	Aucun	Fixe	Bac	99
74	Aucun	1er niveau	Cellules	Bac	90
75	Aucun	1er niveau	Cellules	Bac	99
76	Toutes	Aucun	Cellules	Bac	90
77	Toutes	Aucun	Cellules	Kanban	90
78	Aucun	1er niveau	Fixe	Kanban	90
79	Toutes	Aucun	Cellules	Kanban	99
80	Toutes	1er niveau	Fixe	Kanban	90
81	Toutes	1er niveau	Cellules	Bac	99
82	Aucun	1er niveau	Fixe	Kanban	99
83	Toutes	Aucun	Fixe	Kanban	99
84	Aucun	Aucun	Cellules	Bac	90
85	Aucun	Aucun	Fixe	Bac	90
86	Aucun	Aucun	Fixe	Kanban	90
87	Toutes	Aucun	Fixe	Bac	90
88	Toutes	Aucun	Fixe	Kanban	99
89	Toutes	1er niveau	Cellules	Bac	99
90	Aucun	Aucun	Cellules	Bac	99
91	Toutes	1er niveau	Cellules	Kanban	99
92	Toutes	1er niveau	Cellules	Bac	90

Tableau ANNEXE IV-4 : Plan complet (suite)

Expérience	Interdisciplinarité	Structure Modulaire	Type de Production	Alimentation	Livraison à temps
93	Aucun	1er niveau	Cellules	Kanban	99
94	Toutes	1er niveau	Fixe	Bac	90
95	Aucun	1er niveau	Cellules	Kanban	99
96	Toutes	Aucun	Cellules	Kanban	99
97	Aucun	1er niveau	Cellules	Bac	90
98	Toutes	1er niveau	Cellules	Kanban	90
99	Toutes	Aucun	Cellules	Kanban	99
100	Toutes	1er niveau	Cellules	Bac	90
101	Toutes	Aucun	Cellules	Bac	90
102	Toutes	1er niveau	Cellules	Kanban	99
103	Aucun	Aucun	Fixe	Kanban	99
104	Aucun	1er niveau	Cellules	Bac	99
105	Aucun	1er niveau	Fixe	Bac	90
106	Aucun	Aucun	Cellules	Bac	90
107	Aucun	Aucun	Cellules	Kanban	99
108	Aucun	1er niveau	Fixe	Kanban	99
109	Aucun	Aucun	Cellules	Kanban	99
110	Toutes	1er niveau	Fixe	Kanban	90
111	Toutes	1er niveau	Fixe	Kanban	99
112	Toutes	Aucun	Cellules	Kanban	99
113	Toutes	1er niveau	Fixe	Bac	99
114	Toutes	Aucun	Fixe	Bac	99
115	Toutes	1er niveau	Cellules	Bac	90
116	Aucun	Aucun	Fixe	Kanban	99
117	Toutes	1er niveau	Fixe	Bac	99
118	Toutes	Aucun	Cellules	Bac	99
119	Toutes	1er niveau	Cellules	Kanban	90
120	Aucun	Aucun	Cellules	Kanban	90
121	Toutes	1er niveau	Fixe	Kanban	90
122	Toutes	1er niveau	Cellules	Bac	99
123	Aucun	Aucun	Cellules	Bac	99
124	Aucun	1er niveau	Fixe	Bac	99
125	Aucun	Aucun	Fixe	Kanban	90

Tableau ANNEXE IV-5 : Plan complet (suite)

Expérience	Interdisciplinarité	Structure Modulaire	Type de Production	Alimentation	Livraison à temps
126	Toutes	1er niveau	Fixe	Bac	90
127	Toutes	1er niveau	Fixe	Kanban	90
128	Aucun	Aucun	Fixe	Kanban	99
129	Aucun	1er niveau	Cellules	Bac	90
130	Aucun	Aucun	Cellules	Kanban	90
131	Aucun	1er niveau	Fixe	Kanban	90
132	Toutes	Aucun	Fixe	Bac	90
133	Toutes	Aucun	Cellules	Kanban	90
134	Aucun	1er niveau	Fixe	Bac	99
135	Aucun	1er niveau	Cellules	Kanban	99
136	Aucun	1er niveau	Cellules	Bac	99
137	Aucun	Aucun	Fixe	Bac	90
138	Toutes	1er niveau	Cellules	Kanban	99
139	Toutes	Aucun	Cellules	Bac	99
140	Aucun	Aucun	Cellules	Bac	99
141	Toutes	Aucun	Fixe	Kanban	99
142	Aucun	1er niveau	Cellules	Bac	99
143	Toutes	1er niveau	Fixe	Kanban	99
144	Aucun	Aucun	Cellules	Bac	90
145	Aucun	Aucun	Cellules	Kanban	90
146	Toutes	1er niveau	Cellules	Bac	99
147	Toutes	Aucun	Fixe	Bac	90
148	Aucun	Aucun	Fixe	Kanban	90
149	Aucun	Aucun	Fixe	Bac	90
150	Aucun	1er niveau	Cellules	Kanban	99
151	Toutes	Aucun	Fixe	Kanban	90
152	Aucun	1er niveau	Fixe	Kanban	90
153	Aucun	Aucun	Fixe	Bac	99
154	Aucun	1er niveau	Cellules	Kanban	99
155	Toutes	Aucun	Fixe	Kanban	90
156	Aucun	1er niveau	Fixe	Bac	99
157	Aucun	Aucun	Fixe	Bac	99
158	Toutes	Aucun	Fixe	Kanban	99
159	Aucun	1er niveau	Cellules	Kanban	90
160	Aucun	1er niveau	Cellules	Kanban	90

ANNEXE V

RÉSULTATS DU PLAN COMPLET

Tableau ANNEXE V-1 : Résultats du plan complet

Expérience	Quantité sortante	Cmd en production	Temps de réaction	Temps de passage
1	914	2,9574	27,2052	23,6628
2	850	2,8941	31,1979	22,1285
3	870	2,8758	31,9052	22,9672
4	721	3,9531	69,6558	46,1938
5	899	3,6585	35,2986	25,267
6	704	3,9258	54,3692	47,4759
7	883	2,5888	35,4387	25,3857
8	882	3,8228	29,2686	25,2619
9	570	3	54,5393	47,5075
10	875	3,1185	30,7553	21,7057
11	735	3,9222	68,7128	45,0377
12	843	3,643	29,3238	25,2579
13	756	4,6063	60,6284	53,2843
14	839	3,1618	25,0842	21,5118
15	873	3,8348	35,7205	26,093
16	848	3,9419	30,7113	25,7424
17	846	3,2444	25,9507	22,274
18	703	4	59,0029	51,2356
19	891	3,8859	29,2946	25,3824
20	885	3,9766	29,9791	25,8042
21	711	4	57,4671	50,0548
22	587	3	53,1297	46,1566
23	755	4,6316	78,1761	53,2853
24	734	3,937	52,7938	45,8406
25	893	3,8542	35,5981	25,9627
26	868	3,2128	31,4836	22,0124
27	869	3,2368	31,8034	22,3284
28	591	3	52,405	45,6774
29	755	4,5934	77,4051	53,0911
30	729	4,0122	70,2225	46,3442
31	601	3	68,7894	45,0063

Tableau ANNEXE V-2 : Résultats du plan complet (suite)

Expérience	Quantité sortante	Cmd en production	Temps de réaction	Temps de passage
32	757	4,6433	60,3357	53,3243
33	869	3,1631	24,9292	21,6223
34	565	3	71,2863	47,519
35	778	4,5961	59,5494	52,1786
36	755	4,5771	61,1772	53,1529
37	856	3,5891	34,315	24,6268
38	598	3	69,1582	45,1707
39	756	4,0239	68,9976	45,1887
40	724	4,0373	54,5854	47,293
41	906	3,6112	35,0013	25,3056
42	595	3	52,3407	45,0726
43	874	3,5517	29,3472	25,184
44	883	2,7985	30,7113	21,7194
45	890	3,6259	34,8901	25,1013
46	787	4,5964	76,9918	52,5321
47	920	3,5537	29,2955	25,421
48	779	4,602	75,6595	51,2725
49	588	3	53,0404	46,0799
50	749	3,9759	68,0782	44,7066
51	902	3,1247	30,4273	21,7505
52	685	4	60,6381	52,7337
53	900	2,9204	31,6748	22,9836
54	859	3,8076	29,8021	25,4962
55	915	3,6108	28,8919	24,7488
56	962	3,2285	31,5616	21,9511
57	712	4	75,4464	50,6261
58	681	4	77,3442	52,9269
59	739	3,8961	50,8898	44,4265
60	586	3	69,8579	46,0913
61	722	4	57,7411	50,0171
62	891	3,9233	35,7491	25,2165
63	740	4,0624	69,9218	46,6277
64	700	4	58,3648	50,992
65	886	3,5824	34,2246	24,4003
66	703	4	75,5033	51,2883
67	837	3,5912	29,3854	25,1938
68	721	4	74,5172	50,2689
69	890	3,81	28,884	24,8335

Tableau ANNEXE V-3 : Résultats du plan complet (suite)

Expérience	Quantité sortante	Cmd en production	Temps de réaction	Temps de passage
70	915	3,7813	35,0922	25,3942
71	921	2,863	32,1537	22,4459
72	792	4,5894	75,3072	51,1548
73	748	4,604	61,1835	53,6661
74	878	2,9046	32,2019	22,6584
75	850	2,8996	25,3888	22,1707
76	708	4,0071	71,4548	47,689
77	733	3,9673	70,084	45,9674
78	938	3,6087	34,975	25,2325
79	736	4,038	53,6923	46,5995
80	887	3,9295	35,2496	25,2854
81	872	3,125	24,9805	21,8988
82	927	3,6655	29,6335	25,229
83	783	4,5281	58,4087	50,8717
84	583	3	70,2937	46,653
85	684	4	76,9414	52,4863
86	712	4	74,7202	50,5449
87	757	4,6101	77,8274	53,4093
88	821	4,5874	57,0317	49,5715
89	931	3,2637	25,6876	22,345
90	598	3	52,0564	44,9037
91	912	3,1548	25,0326	21,753
92	865	3,3686	31,6644	23,3704
93	860	2,914	26,3853	22,8658
94	960	3,8264	35,1219	25,494
95	885	2,9216	25,9664	22,5452
96	752	4,0053	52,1304	45,3376
97	854	2,9264	32,8184	23,6252
98	904	3,1913	32,3393	22,5767
99	727	4,0069	53,5333	46,3905
100	913	3,1783	31,8469	22,2692
101	742	3,9756	69,0304	45,1061
102	841	3,2172	25,6594	22,2667
103	724	4	57,3602	49,693
104	933	2,8935	25,6173	22,4237
105	904	3,5555	34,4945	24,6675
106	590	3	69,4228	45,9204

Tableau ANNEXE V-4 : Résultats du plan complet (suite)

Expérience	Quantité sortante	Cmd en production	Temps de réaction	Temps de passage
107	589	3	52,7963	45,7996
108	893	3,4941	28,2577	24,6475
109	608	3	51,9719	44,5048
110	869	3,8624	35,1208	25,331
111	890	3,7648	28,8026	25,0256
112	728	4,0704	54,2604	47,276
113	863	3,8359	30,014	25,9461
114	769	4,5943	60,21	52,2884
115	910	3,2423	31,363	22,2445
116	701	4	58,4854	51,1796
117	907	3,7038	28,7826	24,9603
118	716	3,9651	54,578	46,8745
119	934	3,1468	31,0406	21,7611
120	581	3	70,1845	46,515
121	928	3,7083	35,4606	25,4463
122	888	3,1969	26,1528	22,4712
123	562	3	55,1796	48,0919
124	911	3,6282	28,2484	24,6819
125	710	4	75,1973	50,7195
126	923	3,8123	34,6199	25,5732
127	875	3,9304	35,7122	25,7315
128	726	4	56,5762	49,7856
129	896	2,8049	30,3955	21,5115
130	601	3	69,6158	45,2794
131	900	3,5984	34,768	25,5853
132	757	4,5782	77,1738	52,5868
133	745	3,9986	69,6486	46,1003
134	911	3,4883	28,3339	24,6065
135	924	2,8825	25,0817	21,8243
136	870	2,903	26,1456	22,4526
137	691	4	76,4933	52,1243
138	893	3,0857	24,1954	21,1727
139	738	3,9201	52,2773	44,9985
140	600	3	52,2163	45,0679
141	785	4,5684	58,4604	50,7035
142	911	2,8711	25,1069	22,0548
143	913	3,7151	29,1249	25,3611

Tableau ANNEXE V-5 : Résultats du plan complet (suite)

Expérience	Quantité sortante	Cmd en production	Temps de réaction	Temps de passage
144	588	3	69,4698	46,0248
145	594	3	68,6727	45,3538
146	896	3,1751	25,0705	21,9965
147	749	4,5968	77,9336	53,5221
148	720	4	74,7725	49,781
149	693	4	76,0477	52,0236
150	841	2,9218	26,089	22,5944
151	768	4,5711	76,8734	52,601
152	928	3,5596	34,0473	24,5204
153	676	4	60,7545	53,3287
154	892	2,9005	25,6507	22,3266
155	802	4,5684	74,1508	49,9306
156	867	3,6313	29,8247	25,8814
157	713	4	58,608	50,9058
158	784	4,5914	58,7454	50,8841
159	891	2,9009	31,8014	23,1074
160	975	2,8802	30,9927	22,1914

ANNEXE VI

RÉSULTATS ANOVA PLAN COMPLET

General Linear Model: Number out versus Intdsc; SMod; ...

Factor	Type	Levels	Values
Intdsc	fixed	2	Aucun; Toutes
SMod	fixed	2	1er niveau; Aucun
TProd	fixed	2	Cellules; Fixe
Alim	fixed	2	Bac; Kanban
LivATps	fixed	2	90; 99

Analysis of Variance for Number out, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Intdsc	1	108941	108941	108941	201,90	0,000
SMod	1	1474752	1474752	1474752	2733,16	0,000
Intdsc*SMod	1	114758	114758	114758	212,68	0,000
TProd	1	65489	65489	65489	121,37	0,000
Intdsc*TProd	1	15386	15386	15386	28,51	0,000
SMod*TProd	1	54428	54428	54428	100,87	0,000
Intdsc*SMod*TProd	1	13969	13969	13969	25,89	0,000
Alim	1	4295	4295	4295	7,96	0,006
Intdsc*Alim	1	779	779	779	1,44	0,232
SMod*Alim	1	289	289	289	0,54	0,466
Intdsc*SMod*Alim	1	1544	1544	1544	2,86	0,093
TProd*Alim	1	439	439	439	0,81	0,369
Intdsc*TProd*Alim	1	273	273	273	0,51	0,478
SMod*TProd*Alim	1	39	39	39	0,07	0,788
LivATps	1	1697	1697	1697	3,14	0,078
Intdsc*LivATps	1	685	685	685	1,27	0,262
SMod*LivATps	1	1829	1829	1829	3,39	0,068
Intdsc*SMod*LivATps	1	278	278	278	0,52	0,474
TProd*LivATps	1	66	66	66	0,12	0,726
Intdsc*TProd*LivATps	1	131	131	131	0,24	0,622
SMod*TProd*LivATps	1	146	146	146	0,27	0,603
Alim*LivATps	1	522	522	522	0,97	0,327
Intdsc*Alim*LivATps	1	581	581	581	1,08	0,301
SMod*Alim*LivATps	1	104	104	104	0,19	0,661
TProd*Alim*LivATps	1	1482	1482	1482	2,75	0,100
Error	134	72303	72303	540		
Total	159	1935206				

S = 23,2288 R-Sq = 96,26% R-Sq(adj) = 95,57%

Unusual Observations for Number out

Obs	Number out	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
14	839,000	883,913	9,364	-44,913	-2,11 R
56	962,000	902,487	9,364	59,513	2,80 R
67	837,000	879,787	9,364	-42,787	-2,01 R
89	931,000	883,913	9,364	47,087	2,22 R
94	960,000	905,488	9,364	54,512	2,56 R
104	933,000	888,750	9,364	44,250	2,08 R
150	841,000	886,988	9,364	-45,988	-2,16 R
160	975,000	906,175	9,364	68,825	3,24 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Intdsc	N	Mean	Grouping
Toutes	80	821,6	A
Aucun	80	769,4	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

SMod	N	Mean	Grouping
1er niveau	80	891,5	A
Aucun	80	699,5	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Intdsc	SMod	N	Mean	Grouping
Aucun	1er niveau	40	892,2	A
Toutes	1er niveau	40	890,8	A
Toutes	Aucun	40	752,3	B
Aucun	Aucun	40	646,6	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

TProd	N	Mean	Grouping
Fixe	80	815,7	A
Cellules	80	775,2	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Intdsc	TProd	N	Mean	Grouping
Toutes	Fixe	40	832,0	A
Toutes	Cellules	40	811,1	B
Aucun	Fixe	40	799,4	B
Aucun	Cellules	40	739,3	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

SMod	TProd	N	Mean	Grouping
1er niveau	Fixe	40	893,3	A
1er niveau	Cellules	40	889,7	A
Aucun	Fixe	40	738,1	B
Aucun	Cellules	40	660,8	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Intdsc	SMod	TProd	N	Mean	Grouping
Aucun	1er niveau	Fixe	20	894,4	A
Toutes	1er niveau	Fixe	20	892,1	A
Aucun	1er niveau	Cellules	20	889,9	A
Toutes	1er niveau	Cellules	20	889,5	A
Toutes	Aucun	Fixe	20	771,9	B
Toutes	Aucun	Cellules	20	732,8	C
Aucun	Aucun	Fixe	20	704,4	D
Aucun	Aucun	Cellules	20	588,8	E

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Alim	N	Mean	Grouping
Kanban	80	800,6	A
Bac	80	790,3	B

Means that do not share a letter are significantly different.

General Linear Model: Cmd en prod versus Intdsc; SMod; ...

Factor	Type	Levels	Values
Intdsc	fixed	2	Aucun; Toutes
SMod	fixed	2	1er niveau; Aucun
TProd	fixed	2	Cellules; Fixe
Alim	fixed	2	Bac; Kanban
LivATps	fixed	2	90; 99

Analysis of Variance for Cmd en prod, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Intdsc	1	11,7874	11,7874	11,7874	1380,01	0,000
SMod	1	11,1835	11,1835	11,1835	1309,31	0,000
Intdsc*SMod	1	2,4109	2,4109	2,4109	282,25	0,000
TProd	1	21,0443	21,0443	21,0443	2463,76	0,000
Intdsc*TProd	1	0,3978	0,3978	0,3978	46,57	0,000
SMod*TProd	1	0,2434	0,2434	0,2434	28,50	0,000
Intdsc*SMod*TProd	1	0,3759	0,3759	0,3759	44,01	0,000
Alim	1	0,0052	0,0052	0,0052	0,61	0,435
Intdsc*Alim	1	0,0164	0,0164	0,0164	1,92	0,168
SMod*Alim	1	0,0279	0,0279	0,0279	3,26	0,073
Intdsc*SMod*Alim	1	0,0011	0,0011	0,0011	0,13	0,718
TProd*Alim	1	0,0169	0,0169	0,0169	1,98	0,161
Intdsc*TProd*Alim	1	0,0011	0,0011	0,0011	0,13	0,718
SMod*TProd*Alim	1	0,0001	0,0001	0,0001	0,01	0,909
LivATps	1	0,0021	0,0021	0,0021	0,25	0,621
Intdsc*LivATps	1	0,0196	0,0196	0,0196	2,30	0,132
SMod*LivATps	1	0,0046	0,0046	0,0046	0,53	0,466
Intdsc*SMod*LivATps	1	0,0140	0,0140	0,0140	1,64	0,202
TProd*LivATps	1	0,0031	0,0031	0,0031	0,36	0,550
Intdsc*TProd*LivATps	1	0,0014	0,0014	0,0014	0,16	0,691
SMod*TProd*LivATps	1	0,0022	0,0022	0,0022	0,26	0,614
Alim*LivATps	1	0,0090	0,0090	0,0090	1,05	0,307
Intdsc*Alim*LivATps	1	0,0059	0,0059	0,0059	0,69	0,406
SMod*Alim*LivATps	1	0,0048	0,0048	0,0048	0,56	0,456
TProd*Alim*LivATps	1	0,0000	0,0000	0,0000	0,00	0,972
Error	134	1,1446	1,1446	0,0085		
Total	159	48,7231				

S = 0,0924204 R-Sq = 97,65% R-Sq(adj) = 97,21%

Unusual Observations for Cmd en prod

Obs	Cmd en prod	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
7	2,58880	3,43833	0,03726	-0,84953	-10,04 R
41	3,61120	3,43833	0,03726	0,17287	2,04 R
78	3,60870	3,43833	0,03726	0,17037	2,01 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Intdsc	N	Mean	Grouping
Toutes	80	3,9	A
Aucun	80	3,4	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

SMod	N	Mean	Grouping
Aucun	80	3,9	A
1er niveau	80	3,4	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Intdsc	SMod	N	Mean	Grouping
Toutes	Aucun	40	4,3	A
Toutes	1er niveau	40	3,5	B
Aucun	Aucun	40	3,5	B
Aucun	1er niveau	40	3,2	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

TProd	N	Mean	Grouping
Fixe	80	4,0	A
Cellules	80	3,3	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Intdsc	TProd	N	Mean	Grouping
Toutes	Fixe	40	4,2	A
Aucun	Fixe	40	3,8	B
Toutes	Cellules	40	3,6	C
Aucun	Cellules	40	2,9	D

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

SMod	TProd	N	Mean	Grouping
Aucun	Fixe	40	4,3	A
1er niveau	Fixe	40	3,7	B
Aucun	Cellules	40	3,5	C
1er niveau	Cellules	40	3,0	D

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Intdsc	SMod	TProd	N	Mean	Grouping
Toutes	Aucun	Fixe	20	4,6	A
Aucun	Aucun	Fixe	20	4,0	B
Toutes	Aucun	Cellules	20	4,0	B
Toutes	1er niveau	Fixe	20	3,8	C
Aucun	1er niveau	Fixe	20	3,5	D
Toutes	1er niveau	Cellules	20	3,2	E
Aucun	Aucun	Cellules	20	3,0	F
Aucun	1er niveau	Cellules	20	2,9	G

General Linear Model: Temps de passage versus Intdsc; SMod; ...

Factor	Type	Levels	Values
Intdsc	fixed	2	Aucun; Toutes
SMod	fixed	2	1er niveau; Aucun
TProd	fixed	2	Cellules; Fixe
Alim	fixed	2	Bac; Kanban
LivATps	fixed	2	90; 99

Analysis of Variance for Temps de passage, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Intdsc	1	3,3	3,3	3,3	5,39	0,022
SMod	1	25101,8	25101,8	25101,8	40606,97	0,000
Intdsc*SMod	1	3,7	3,7	3,7	5,95	0,016
TProd	1	743,5	743,5	743,5	1202,72	0,000
Intdsc*TProd	1	7,6	7,6	7,6	12,31	0,001
SMod*TProd	1	72,1	72,1	72,1	116,65	0,000
Intdsc*SMod*TProd	1	0,0	0,0	0,0	0,00	0,989
Alim	1	6,0	6,0	6,0	9,63	0,002
Intdsc*Alim	1	0,1	0,1	0,1	0,11	0,744
SMod*Alim	1	4,6	4,6	4,6	7,41	0,007
Intdsc*SMod*Alim	1	0,5	0,5	0,5	0,82	0,366
TProd*Alim	1	2,1	2,1	2,1	3,41	0,067
Intdsc*TProd*Alim	1	2,1	2,1	2,1	3,47	0,065
SMod*TProd*Alim	1	5,2	5,2	5,2	8,35	0,004
LivATps	1	0,3	0,3	0,3	0,56	0,454
Intdsc*LivATps	1	0,0	0,0	0,0	0,01	0,913
SMod*LivATps	1	0,0	0,0	0,0	0,00	0,953
Intdsc*SMod*LivATps	1	0,4	0,4	0,4	0,70	0,403
TProd*LivATps	1	0,3	0,3	0,3	0,51	0,478
Intdsc*TProd*LivATps	1	0,2	0,2	0,2	0,26	0,612
SMod*TProd*LivATps	1	0,8	0,8	0,8	1,30	0,257
Alim*LivATps	1	0,1	0,1	0,1	0,13	0,723
Intdsc*Alim*LivATps	1	0,1	0,1	0,1	0,18	0,674
SMod*Alim*LivATps	1	0,4	0,4	0,4	0,64	0,426
TProd*Alim*LivATps	1	0,0	0,0	0,0	0,07	0,790
Error	134	82,8	82,8	0,6		
Total	159	26038,1				

S = 0,786235 R-Sq = 99,68% R-Sq(adj) = 99,62%

Unusual Observations for Temps de passage

Obs	Temps de passage	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
13	53,2843	51,3878	0,3169	1,8965	2,64 R
23	53,2853	51,5522	0,3169	1,7331	2,41 R
52	52,7337	50,4610	0,3169	2,2727	3,16 R

59	44,4265	46,0689	0,3169	-1,6424	-2,28 R
61	50,0171	51,4669	0,3169	-1,4498	-2,01 R
76	47,6890	45,8291	0,3169	1,8599	2,58 R
88	49,5715	51,3878	0,3169	-1,8163	-2,52 R
123	48,0919	46,0935	0,3169	1,9984	2,78 R
153	53,3287	51,4669	0,3169	1,8618	2,59 R
155	49,9306	51,5522	0,3169	-1,6216	-2,25 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Intdsc	N	Mean	Grouping
Toutes	80	36,4	A
Aucun	80	36,2	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

SMod	N	Mean	Grouping
Aucun	80	48,8	A
1er niveau	80	23,8	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Intdsc	SMod	N	Mean	Grouping
Toutes	Aucun	40	49,1	A
Aucun	Aucun	40	48,5	B
Aucun	1er niveau	40	23,8	C
Toutes	1er niveau	40	23,8	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

TProd	N	Mean	Grouping
Fixe	80	38,5	A
Cellules	80	34,1	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Intdsc	TProd	N	Mean	Grouping
Toutes	Fixe	40	38,8	A

Aucun	Fixe	40	38,1	B
Aucun	Cellules	40	34,2	C
Toutes	Cellules	40	34,1	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

SMod	TProd	N	Mean	Grouping
Aucun	Fixe	40	51,7	A
Aucun	Cellules	40	46,0	B
1er niveau	Fixe	40	25,3	C
1er niveau	Cellules	40	22,3	D

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Alim	N	Mean	Grouping
Bac	80	36,5	A
Kanban	80	36,1	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

SMod	Alim	N	Mean	Grouping
Aucun	Bac	40	49,2	A
Aucun	Kanban	40	48,5	B
1er niveau	Bac	40	23,8	C
1er niveau	Kanban	40	23,7	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

SMod	TProd	Alim	N	Mean	Grouping
Aucun	Fixe	Bac	20	52,3	A
Aucun	Fixe	Kanban	20	51,0	B
Aucun	Cellules	Bac	20	46,1	C
Aucun	Cellules	Kanban	20	45,9	C
1er niveau	Fixe	Kanban	20	25,3	D
1er niveau	Fixe	Bac	20	25,2	D
1er niveau	Cellules	Bac	20	22,4	E
1er niveau	Cellules	Kanban	20	22,2	E

Means that do not share a letter are significantly different.

General Linear Model: Temps de reaction versus Intdsc; SMod; ...

Factor	Type	Levels	Values
Intdsc	fixed	2	Aucun; Toutes
SMod	fixed	2	1er niveau; Aucun
TProd	fixed	2	Cellules; Fixe
Alim	fixed	2	Bac; Kanban
LivATps	fixed	2	90; 99

Analysis of Variance for Temps de reaction, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Intdsc	1	4,4	4,4	4,4	5,88	0,017
SMod	1	46680,7	46680,7	46680,7	63022,90	0,000
Intdsc*SMod	1	2,8	2,8	2,8	3,75	0,055
TProd	1	972,5	972,5	972,5	1312,90	0,000
Intdsc*TProd	1	8,3	8,3	8,3	11,14	0,001
SMod*TProd	1	69,3	69,3	69,3	93,53	0,000
Intdsc*SMod*TProd	1	0,0	0,0	0,0	0,01	0,914
Alim	1	4,9	4,9	4,9	6,57	0,011
Intdsc*Alim	1	0,2	0,2	0,2	0,21	0,650
SMod*Alim	1	4,8	4,8	4,8	6,51	0,012
Intdsc*SMod*Alim	1	0,2	0,2	0,2	0,33	0,565
TProd*Alim	1	2,9	2,9	2,9	3,92	0,050
Intdsc*TProd*Alim	1	2,6	2,6	2,6	3,50	0,064
SMod*TProd*Alim	1	4,7	4,7	4,7	6,36	0,013
LivATps	1	5152,6	5152,6	5152,6	6956,48	0,000
Intdsc*LivATps	1	0,0	0,0	0,0	0,02	0,883
SMod*LivATps	1	1204,9	1204,9	1204,9	1626,74	0,000
Intdsc*SMod*LivATps	1	0,7	0,7	0,7	0,98	0,323
TProd*LivATps	1	0,7	0,7	0,7	1,01	0,318
Intdsc*TProd*LivATps	1	0,0	0,0	0,0	0,02	0,876
SMod*TProd*LivATps	1	1,8	1,8	1,8	2,45	0,120
Alim*LivATps	1	0,0	0,0	0,0	0,00	0,945
Intdsc*Alim*LivATps	1	0,4	0,4	0,4	0,48	0,491
SMod*Alim*LivATps	1	0,3	0,3	0,3	0,38	0,538
TProd*Alim*LivATps	1	0,1	0,1	0,1	0,09	0,763
Error	134	99,3	99,3	0,7		
Total	159	54219,0				

S = 0,860636 R-Sq = 99,82% R-Sq(adj) = 99,78%

Unusual Observations for Temps de reaction

Obs	Temps de reaction	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
13	60,6284	58,9138	0,3469	1,7146	2,18 R
23	78,1761	75,9863	0,3469	2,1898	2,78 R
52	60,6381	57,9661	0,3469	2,6720	3,39 R

59	50,8898	53,1439	0,3469	-2,2541	-2,86 R
76	71,4548	69,4359	0,3469	2,0189	2,56 R
88	57,0317	58,9138	0,3469	-1,8821	-2,39 R
123	55,1796	53,1842	0,3469	1,9954	2,53 R
153	60,7545	58,9508	0,3469	1,8037	2,29 R
155	74,1508	75,9863	0,3469	-1,8355	-2,33 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Intdsc	N	Mean	Grouping
Toutes	80	47,6	A
Aucun	80	47,3	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

SMod	N	Mean	Grouping
Aucun	80	64,5	A
1er niveau	80	30,3	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

TProd	N	Mean	Grouping
Fixe	80	49,9	A
Cellules	80	45,0	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Intdsc	TProd	N	Mean	Grouping
Toutes	Fixe	40	50,3	A
Aucun	Fixe	40	49,5	B
Aucun	Cellules	40	45,0	C
Toutes	Cellules	40	44,9	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

SMod	TProd	N	Mean	Grouping
Aucun	Fixe	40	67,6	A
Aucun	Cellules	40	61,4	B

ler niveau	Fixe	40	32,2	C
ler niveau	Cellules	40	28,5	D

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Alim	N	Mean	Grouping
Bac	80	47,6	A
Kanban	80	47,3	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

SMod	Alim	N	Mean	Grouping
Aucun	Bac	40	64,9	A
Aucun	Kanban	40	64,2	B
ler niveau	Bac	40	30,3	C
ler niveau	Kanban	40	30,3	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

TProd	Alim	N	Mean	Grouping
Fixe	Bac	40	50,2	A
Fixe	Kanban	40	49,6	B
Cellules	Bac	40	45,0	C
Cellules	Kanban	40	44,9	C

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

SMod	TProd	Alim	N	Mean	Grouping
Aucun	Fixe	Bac	20	68,3	A
Aucun	Fixe	Kanban	20	67,0	B
Aucun	Cellules	Bac	20	61,4	C
Aucun	Cellules	Kanban	20	61,3	C
ler niveau	Fixe	Kanban	20	32,2	D
ler niveau	Fixe	Bac	20	32,1	D
ler niveau	Cellules	Bac	20	28,6	E
ler niveau	Cellules	Kanban	20	28,5	E

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

LivATps	N	Mean	Grouping
90	80	53,1	A
99	80	41,8	B

Means that do not share a letter are significantly different.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

SMod	LivATps	N	Mean	Grouping
Aucun	90	40	72,9	A
Aucun	99	40	56,1	B
1er niveau	90	40	33,3	C
1er niveau	99	40	27,4	D

Means that do not share a letter are significantly different.

ANNEXE VII

RÉSULTATS DES TESTS DE VALIDATION

Tableau ANNEXE VII-1 : Résultats du plan de validation pour la situation initiale

Expérience	Nb Out	NB WIP	Délai réaction	Temps passage
1	703	4	59,0029	51,2356
2	711	4	57,4671	50,0548
3	722	4	57,7411	50,0171
4	676	4	60,7545	53,3287
5	713	4	58,608	50,9058
6	690	4	59,2692	52,0987
7	697	4	59,6278	51,7407
8	716	4	57,779	50,1776
9	687	4	60,0688	52,6155
10	698	4	59,2726	51,7099

Tableau ANNEXE VII-2 : Résultats du plan de validation pour la situation proposée

Expérience	Nb Out	NB WIP	Délai réaction	Temps passage
1	846	3,2444	25,9507	22,274
2	869	3,1631	24,9292	21,6223
3	912	3,1548	25,0326	21,753
4	841	3,2172	25,6594	22,2667
5	893	3,0857	24,1954	21,1727
6	895	3,1705	24,4998	21,4771
7	893	3,2216	25,1017	22,0138
8	882	3,1905	25,0516	21,9721
9	882	3,1324	24,6392	21,1956
10	899	3,177	25,1588	21,8256

Tableau ANNEXE VII-3 : Résultats du plan de validation pour la situation post-Mitacs

Expérience	Nb Out	NB WIP	Délai réaction	Temps passage
1	760	3,5433	47,2222	40,0263
2	789	3,5424	45,6491	38,6974
3	796	3,5647	44,3989	37,9104
4	808	3,562	44,7736	37,5961
5	788	3,5195	45,2124	38,2569
6	794	3,5444	45,26	38,0978
7	809	3,5401	44,0571	37,3406
8	836	3,4982	43,2267	36,0984
9	759	3,5577	46,9397	40,0063
10	814	3,503	44,376	37,3166

ANNEXE VIII

ANALYSE ET TEST DE TUKEY DES TESTS DE VALIDATION

General Linear Model: Nb Out versus Experience

Factor	Type	Levels	Values
Experience	fixed	2	1; 2

Analysis of Variance for Nb Out, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Experience	1	161820	161820	161820	440,01	0,000
Error	18	6620	6620	368		
Total	19	168440				

S = 19,1771 R-Sq = 96,07% R-Sq(adj) = 95,85%

Unusual Observations for Nb Out

Obs	Nb Out	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
4	841,000	881,200	6,064	-40,200	-2,21 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Experience	N	Mean	Grouping
1	10	881,2	A
2	10	701,3	B

Means that do not share a letter are significantly different.

General Linear Model: NB WIP versus Experience

Factor	Type	Levels	Values
Experience	fixed	2	1; 2

Analysis of Variance for NB WIP, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Experience	1	3,3972	3,3972	3,3972	3157,40	0,000
Error	18	0,0194	0,0194	0,0011		
Total	19	3,4166				

S = 0,0328016 R-Sq = 99,43% R-Sq(adj) = 99,40%

Unusual Observations for NB WIP

Obs	NB WIP	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
1	3,24440	3,17572	0,01037	0,06868	2,21 R
5	3,08570	3,17572	0,01037	-0,09002	-2,89 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Experience	N	Mean	Grouping
2	10	4,0	A
1	10	3,2	B

Means that do not share a letter are significantly different.

General Linear Model: Temps passage versus Experience

Factor	Type	Levels	Values
Experience	fixed	2	1; 2

Analysis of Variance for Temps passage, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Experience	1	4390,0	4390,0	4390,0	6182,72	0,000
Error	18	12,8	12,8	0,7		
Total	19	4402,8				

S = 0,842643 R-Sq = 99,71% R-Sq(adj) = 99,69%

Unusual Observations for Temps passage

Obs	Temps passage	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
14	53,3287	51,3884	0,2665	1,9403	2,43 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Experience	N	Mean	Grouping
2	10	51,4	A
1	10	21,8	B

Means that do not share a letter are significantly different.

General Linear Model: Délai réaction versus Experience

Factor	Type	Levels	Values
Experience	fixed	2	1; 2

Analysis of Variance for Délai réaction, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Experience	1	5758,7	5758,7	5758,7	8142,79	0,000
Error	18	12,7	12,7	0,7		
Total	19	5771,4				

S = 0,840960 R-Sq = 99,78% R-Sq(adj) = 99,77%

Unusual Observations for Délai réaction

Obs	Délai réaction	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
14	60,7545	58,9591	0,2659	1,7954	2,25 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Experience	N	Mean	Grouping
2	10	59,0	A
1	10	25,0	B

Means that do not share a letter are significantly different.

ANNEXE IX

RÉSULTATS DES TESTS EN RÉGIME PERMANENT

Tableau ANNEXE IX-1 : Résultats du plan en régime permanent

Expérience	Nb Out	NB WIP	Délai réaction	Temps passage
1	846	3,2444	25,9507	22,274
2	869	3,1631	24,9292	21,6223
3	912	3,1548	25,0326	21,753
4	841	3,2172	25,6594	22,2667
5	893	3,0857	24,1954	21,1727
6	895	3,1705	24,4998	21,4771
7	893	3,2216	25,1017	22,0138
8	882	3,1905	25,0516	21,9721
9	882	3,1324	24,6392	21,1956
10	899	3,177	25,1588	21,8256

ANNEXE X

ANALYSE ET TEST DE TUKEY DES TESTS EN RÉGIME PERMANENT

General Linear Model: Nb Out versus Etat du plancher

Factor	Type	Levels	Values
Etat du plancher	fixed	2	RegimePermanent; Transition

Analysis of Variance for Nb Out, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Etat du plancher	1	1862,5	1862,5	1862,5	5,00	0,038
Error	18	6702,1	6702,1	372,3		
Total	19	8564,5				

S = 19,2961 R-Sq = 21,75% R-Sq(adj) = 17,40%

Unusual Observations for Nb Out

Obs	Nb Out	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
14	841,000	881,200	6,102	-40,200	-2,20 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Etat du plancher	N	Mean	Grouping
RegimePermanent	10	900,5	A
Transition	10	881,2	B

Means that do not share a letter are significantly different.

General Linear Model: NB WIP versus Etat du plancher

Factor	Type	Levels	Values
Etat du plancher	fixed	2	RegimePermanent; Transition

Analysis of Variance for NB WIP, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Etat du plancher	1	0,19218	0,19218	0,19218	104,12	0,000
Error	18	0,03322	0,03322	0,00185		
Total	19	0,22540				

S = 0,0429620 R-Sq = 85,26% R-Sq(adj) = 84,44%

Unusual Observations for NB WIP

Obs	NB WIP	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
15	3,08570	3,17572	0,01359	-0,09002	-2,21 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Etat du plancher	N	Mean	Grouping
Transition	10	3,2	A
RegimePermanent	10	3,0	B

Means that do not share a letter are significantly different.

General Linear Model: Temps passage versus Etat du plancher

Factor	Type	Levels	Values
Etat du plancher	fixed	2	RegimePermanent; Transition

Analysis of Variance for Temps passage, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Etat du plancher	1	13,686	13,686	13,686	149,23	0,000
Error	18	1,651	1,651	0,092		
Total	19	15,337				

S = 0,302843 R-Sq = 89,24% R-Sq(adj) = 88,64%

Unusual Observations for Temps passage

		Temps				
Obs	passage	Fit	SE Fit	Residual	St Resid	
15	21,1727	21,7573	0,0958	-0,5846	-2,03	R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Etat du plancher	N	Mean	Grouping
Transition	10	21,8	A
RegimePermanent	10	20,1	B

Means that do not share a letter are significantly different.

General Linear Model: Délai réaction versus Etat du plancher

Factor	Type	Levels	Values
Etat du plancher	fixed	2	RegimePermanent; Transition

Analysis of Variance for Délai réaction, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P
Etat du plancher	1	15,482	15,482	15,482	98,59	0,000
Error	18	2,827	2,827	0,157		
Total	19	18,309				

S = 0,396284 R-Sq = 84,56% R-Sq(adj) = 83,70%

Unusual Observations for Délai réaction

Obs	Délai réaction	Fit	SE Fit	Residual	St Resid
11	25,9507	25,0218	0,1253	0,9289	2,47 R
15	24,1954	25,0218	0,1253	-0,8264	-2,20 R

R denotes an observation with a large standardized residual.

Grouping Information Using Tukey Method and 95,0% Confidence

Etat du plancher	N	Mean	Grouping
Transition	10	25,0	A
RegimePermanent	10	23,3	B

Means that do not share a letter are significantly different.